

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Využití vysokorychlostního vodního paprsku pro mikrořezání

Application of High-Speed Water Jet for Micro-Cutting

Student:

Václav Šrom

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání bakalářské práce

Student: **Václav Šrom**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Využití vysokorychlostního vodního paprsku pro mikrořezání**  
**Application of High-Speed Water Jet for Micro-Cutting**

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba řešerše.
2. Základy technologie vysokorychlostního vodního paprsku.
3. Rozdíl mezi klasickým řezáním a mikrořezáním pomocí vodních paprsků.
4. Experimentální zkoušky mikrořezání kovových materiálů, vliv některých parametrů paprsku na kvalitu výsledného produktu.
5. Analýza a interpretace zjištěných poznatků, závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [3] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London : E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [4] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4.
- [5] Série sborníků *International Conference on Water Jetting*, BHR Group.

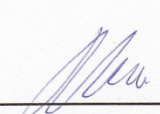
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 18. května 2015

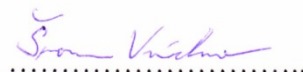
  
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB - TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB - TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. května 2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Václav Šrom

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Domoradovice 81,

Hradec nad Moravicí, 747 41

### Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především svému vedoucímu Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. za připomínky a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat konzultantce Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za poskytnutí potřebných informací ohledně zpracování práce a rovněž kolektivu zaměstnanců Oddělení desintegrace materiálů Ústavu geoniky AVČR za pomoc při experimentech a zpracování výsledků. Poděkování patří také Martinu Fantovi, obchodnímu zástupci fy. Galika, za podklady k tématice mikrořezání. Také děkuji rodině za podporu po celou dobu mého působení na vysoké škole.

**ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

ŠROM, V. *Využití vysokorychlostního paprsku pro mikrořezání: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 59 s. Vedoucí práce: Sitek, L.

Bakalářská práce se zabývá využitím vysokorychlostního vodního paprsku pro mikrořezání. Práce je rozdělená na část teoretickou a na část experimentální. Teoretická část je zaměřena na nekonvenční technologie, mezi které lze zařadit také řezání vodním paprskem. Touto tematikou se zabývám podrobněji. Zmiňuji historii využití vodního paprsku, základní rozdělení paprsků a podrobně rozebírám oblast mikropaprsku. Experimentální část se pak zabývá experimentem, který spočívá v porovnání rozměrů a úkosů tří vzorků vytvořených mikrořezáním abrazivním vodním paprskem a běžně používaným abrazivním vodním paprskem. V závěru porovnávám a hodnotím naměřená data. Uvádím i možnosti eliminace některých negativních jevů vzniklých při mikrořezání.

**ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

ŠROM, V. *Application of High-Speed Water Jet for Micro-Cutting: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2015, 59 p. Thesis head: Sitek, L.

The presented thesis deals with the application of the high-speed water jet for micro-cutting. The work consists of two parts: theoretical and experimental. The theoretical part is focused on unconventional technologies, one of which is represented by the waterjet cutting. This topic is studied in more details. The history of water jet applications and basic classification of jets are described. The area of the micro-waterjet is then described more precisely. The experimental part provides with an experiment which aims at comparing dimensions and chamfers of three samples cut with the abrasive micro-waterjet and the commonly used abrasive waterjet. Finally, the measured data are compared and evaluated. In addition, possibilities of elimination of some negative effects occurring during micro-cutting are presented.

## Obsah

Obsah .....	7
Seznam použitých zkratk .....	9
Úvod.....	10
1. Nekonenční metody obrábění .....	11
1.1. Rozdělení NMO.....	11
1.1.1. Elektroerozivní obrábění EDM .....	12
1.1.2. Obrábění paprskem plazmy PBM .....	14
1.1.3. Obrábění paprskem laseru LBM .....	15
1.1.4. Obrábění paprskem elektronů EBM.....	16
1.1.5. Elektrochemické obrábění ECM .....	17
1.1.6. Chemické obrábění CM .....	18
1.1.7. Ultrazvukové obrábění USM .....	19
2. Vodní paprsek .....	20
2.1. Historie vodního paprsku.....	20
2.2. Obrábění paprskem vody WJM.....	21
2.3. Obrábění abrazivním vodním paprskem AWJM.....	24
2.4. Abrazivo .....	26
3. Mikrořezání a mikroobrábění vodním paprskem.....	27
3.1. Počítačové řízení mikrořezání .....	30
3.2. Abrazivo k mikrořezání .....	31
3.3. Zásobník na abrazivo .....	31
3.4. Trysky.....	32
3.5. Obráběné materiály.....	33
4. Experimentální část.....	35
4.1. Testované vzorky.....	36
4.2. Použité řezací zařízení .....	37
4.3. Měření rozměrů vzorků .....	38
4.4. Mikrořezání vzorku č. 1.....	39
4.4.1. Naměřené rozměry vzorku č. 1 .....	41
4.4.2. Grafy - vzorek č. 1 .....	43

4.5. Řezání vzorku č. 2 abrazivním vodním paprskem .....	44
4.5.1. Naměřené hodnoty vzorku č. 2 .....	46
4.5.2. Grafy - vzorek č. 2 .....	47
4.6. Řezání vzorku č. 3 abrazivním vodním paprskem .....	48
4.6.1. Naměřené hodnoty vzorku č. 3 .....	50
4.6.2. Grafy - porovnání drážek .....	51
4.7. Stanovení úkosů.....	52
5. Zhodnocení výsledků .....	54
5.1. Celkový vzhled, přítomnost otřepů .....	54
5.2. Průstřely.....	54
5.3. Drážky .....	55
5.4. Otvory.....	55
5.5. Úkosy.....	56
Závěr .....	57
Seznam použité literatury .....	58



## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Slovní význam
<b>a</b>	Průměrná vrchní hodnota [mm]
<b>A</b>	Tažnost [%]
<b>ASJ</b>	Abrasive Slurry Jet (Abrazivní suspenzní paprsek)
<b>AWJM</b>	Abrasive Water Jet Machining (Obrábění vodním paprskem s abrazivem)
<b>AWJ</b>	Abrasive Water Jet (Abrazivní vodní paprsek)
<b>b</b>	Průměrná spodní hodnota [mm]
<b>c</b>	Tloušťka materiálu [mm]
<b>CM</b>	Chemical Machining (Chemické obrábění)
<b>CNC</b>	Computer Numeric Control (Počítačové číslicové řízení)
<b>EBM</b>	Electron Beam Machining (Obrábění paprskem elektronů)
<b>ECM</b>	Electro Chemical Machining (Elektrochemické obrábění)
<b>EDM</b>	Electro Discharge Machining (Elektroerozivní obrábění)
<b>LBM</b>	Laser Beam Machining (Obrábění paprskem laseru)
<b>NMO</b>	Nekonvenční metody obrábění
<b>PBM</b>	Plasma Beam Machining (Obrábění paprskem plazmy)
<b>R<sub>m</sub></b>	Mez pevnosti v tahu [MPa]
<b>R<sub>p</sub></b>	Mez kluzu [MPa]
<b>USM</b>	Ultrasonic Machining (Ultrazvukové obrábění)
<b>WJM</b>	Water Jet Machining (Obrábění paprskem vody)

## Úvod

Mikrořezání vodním paprskem je rozvíjející se metodou obrábění. Patří mezi nekonvenční technologie a přebírá tak mnohé vlastnosti a výhody těchto metod. Při mikrořezání vodním paprskem je dosahována velká výrobní přesnost, které nelze docílit žádným jiným druhem vodního paprsku. Další unikátní vlastností vodního paprsku je pak studený řez, který neovlivňuje negativně okolí řezu vysokou teplotou, jako je tomu u některých jiných nekonvenčních technologií.

Teoretická část bakalářské práce uvádí některé nekonvenční metody obrábění, které se v dnešní době velmi často využívají k obrábění tvrdých a těžko obrobitelných materiálů nebo při výrobě tvarově složitých obrobků. V první kapitole jsou zmíněny důvody, které vedly ke vzniku nekonvenčních metod. Následuje rozdělení těchto metod podle fyzikálního principu působení na obrobek. Ke každé nekonvenční neboli progresivní metodě, jak také mohou být nazývány, je uveden princip a oblast využití. Větší pozornost je věnována technologii vodního paprsku, jelikož je základním prvkem mikrořezání (mikroobrábění) vodním paprskem.

Obrábění vodním paprskem je rozděleno na tři základní typy: čistý vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek a abrazivní vodní mikropaprsek, kterému je věnována bakalářská práce. Jsou uvedeny informace o pracovním stroji, řezacím zařízení, používaných řezacích tlacích a řezných tryskách, výhodách a nevýhodách technologie a o abrazivu, které se používá k řezání.

Bakalářská práce obsahuje také experimentální část. Tato část zkoumá rozdíly mezi zkušebními vzorky, které byly řezány abrazivním vodním mikropaprskem a běžným abrazivním paprskem při různých rychlostech řezání. Byly zjišťovány rozdíly mezi rozměry vyřezaných otvorů ve vzorcích a také úkosy vzniklé během řezání.

## 1. Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění (NMO) nepoužívají pro opracování a dělení materiálu běžně používané mechanické nástroje, mezi něž patří např. soustružnické nože, frézy, atd. U těchto metod používáme nástroje, které jsou založeny na principu rozrušování neboli erozi materiálu. Jejich úkolem je vyvinout určitou energii, což vyvolá v materiálu erozivní účinky. Tím dojde k následnému dělení (řezání), popřípadě obrábění materiálu.

K rozvoji nekonvenčních metod obrábění vedla potřeba dělit a obrábět materiály, které disponují vysokou pevností a používají se především v kosmickém průmyslu a letectví. Postupně však docházelo k zvyšování nároků na rozměry a tvar obrobku, tím se NMO zdokonalily. V dnešní době dokážeme pomoci těchto technologií obrábět s přesností až na 1  $\mu\text{m}$ .

V současnosti se NMO využívají pro výrobu tvarově složitých výrobků, kde je kladen požadavek na tepelně neovlivněnou oblast v místě řezu.

K rozšíření NMO výrazně přispělo zdokonalení řídicích systémů CNC. Standardně jsou stroje řízeny ve dvou, popřípadě třech osách, mohou však být řízeny až v šesti osách. Každá NMO musí splňovat určité požadavky na volbu CNC stolu. Např. při obrábění vodním paprskem musí CNC stoly splňovat podmínku např. na odolnost proti působení vody a prachu [13].

### 1.1. Rozdělení NMO

Nekonvenční metody obrábění rozdělujeme dle druhu energie, která se pro obráběcí proces používá. Dle těchto technologických procesů se metody rozdělují na tři skupiny [13]:

#### a) Dělení materiálu tepelným účinkem

- Elektroerozivní obrábění (EDM - Electro Discharge Machining)
- Obrábění paprskem plazmy (PBM - Plasma Beam Machining)
- Obrábění paprskem laseru (LBM - Laser Beam Machining)
- Obrábění paprskem elektronů (EBM - Electron Beam Machining)

b) Dělení materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem

- Elektrochemické obrábění (ECM - Electro Chemical Machining)
- Chemické obrábění (CM - Chemical Machining)

c) Dělení materiálu mechanickým účinkem

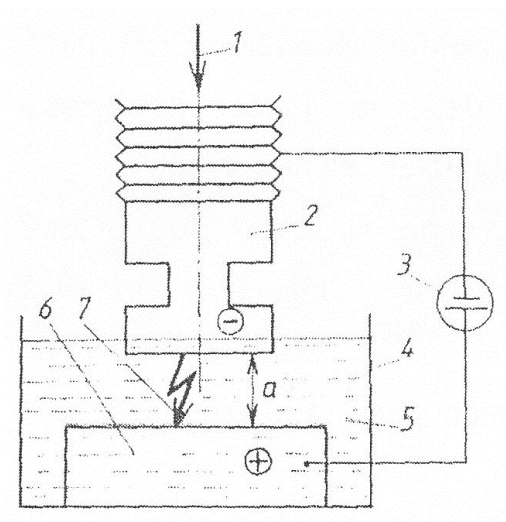
- Ultrazvukové obrábění (USM - Ultrasonic Machining)
- Obrábění paprskem vody (WJM - Water Jet Machining)
- Obrábění abrazivním paprskem vody (AWJM - Abrasive Waterjet Machining)

### 1.1.1. Elektroerozivní obrábění EDM

Princip této nekonvenční metody obrábění spočívá v elektrotepelném procesu, který slouží k následnému úběru materiálu. Samotný úběr probíhá elektrickým výbojem vzniklým mezi elektrodami, a to katodou (nástrojová elektroda) a anodou (obrobek) ponořenou v lázni dielektrika [16]. Jako dielektrikum bývá nejčastěji používána kapalina s vysokým elektrickým odporem, což jsou lehké strojní nebo transformátorové oleje, vodní sklo, deionizovaná a destilovaná voda [17].

Touto technologií obrábění lze zpracovávat pouze materiály, které musí být elektricky vodivé. Protože úběr se děje v důsledku elektroeroze. Elektroeroze probíhá ve zmíněném kapalném prostředí - dielektriku a taktéž může probíhat v prostředí plynném. V těchto prostředích dojde k samotnému výboji vzniklému převedením elektrického napětí mezi elektrodami. Elektrody jsou umístěny ve vzdálenosti 0,005 - 0,5 mm. Při výboji dojde k nárůstu teploty na 3000 až 12000 °C. Při této teplotě nastává tání spolu s následným odpařováním materiálu elektrod, dielektrika a vznikají dynamické síly. Síly způsobí, že se v místě vzniku výboje oddělují části materiálu [16].

Části odděleného materiálu jsou odplaveny proudícím dielektrikem, v němž zůstanou jako spaliny. K odplavení spalin dochází v důsledku přerušení proudění elektrického proudu, jehož čas musí být delší než čas deionizace kapaliny. Tím je zamezeno trvalému výboji a taktéž nežádoucímu úběru v jednom místě. Na obr. 1.1 je znázorněn princip této technologie v praxi.



Obr. 1.1 Schéma zařízení popisující EDM metodu [16],[17].

1 - směr posuvu elektrody, 2 - nástrojová elektroda, 3 - generátor, 4 - pracovní vana, 5- dielektrikum, 6 - obrobek, 7 - el. výboj

V praxi touto EDM technologií můžeme nahradit proces broušení, jelikož zde dosahujeme přesnosti 0,001  $\mu\text{m}$  a drsnosti povrchu  $R_a$  0,2 $\mu\text{m}$  [13].

Elektroerozivní obrábění lze rozdělit na [16]:

- Elektrojiskrové hloubení - základní metoda EDM
  - výroba zápusťek, licích forem
- Elektrojiskrové řezání - přesnost rozměrů a tvaru obrobku závisí na tepelné stabilizaci stroje
  - max. tloušťka materiálu 350 mm
  - drát o průměru 0,03 až 0,07 mm
- Elektrokontaktní obrábění - zvláštní případ EDM
  - vysoký výkon obrábění, ale nízká kvalita obrobku
  - vznik ultrafialového záření

- pro řezání nálitků, vtoků, atd.

- Anodomechanické obrábění
- slouží k obrábění těžkoobrobitelných a tvrdých materiálu

### 1.1.2. Obrábění paprskem plazmy PBM

Plazmový paprsek neboli plazma je vysoce ionizovaný plyn. Technologie tohoto způsobu obrábění je závislá hlavně na ohřevu, popřípadě natavení materiálu při vysokých teplotách. Teploty při PBM přesahují 10000 °C. Za vznikem takto vysokých teplot stojí rozklad molekul plynu během průchodu elektrickým obloukem.

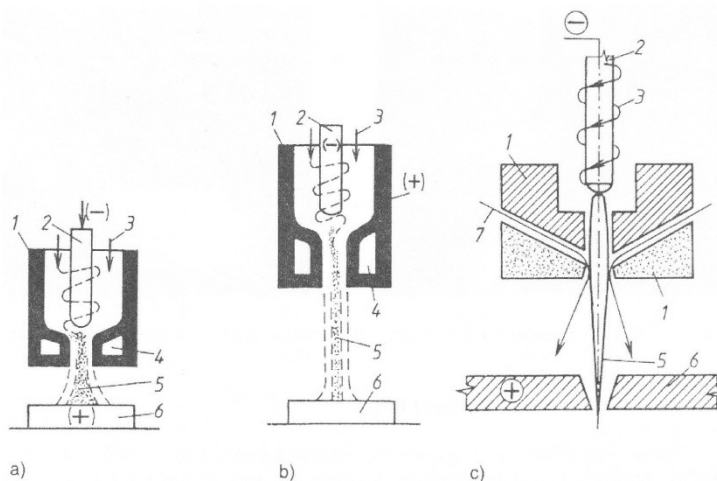
Elektrický oblouk vznikne mezi anodou, která je zastoupená obráběným materiálem nebo tělesem hořáku a netavící se wolframovou katodou. Takto z tělesa hořáku vychází úzký vysokorychlostní plazmový paprsek dosahující průměru 1mm.

Pracoviště používající PBM technologii bývají velmi riziková, proto musí dodržovat velmi přísné bezpečnostní předpisy.

PBM technologií můžeme nejen obrábět, ale také svařovat, řezat nebo nanášet povlaky. Při obrábění paprskem plazmy existují dva způsoby užití hořáku. Při prvním způsobu je odebíraný materiál při obrábění nahříván před břitkem rezného nástroje, což ukazuje obr. 1.2. U takto zvoleného obrábění dochází ke snížení tvrdosti a pevnosti materiálu kvůli ohřevu. Při obrábění se však třísky odebírá snadněji a nástroje mají větší trvanlivost bříty, uvádí se až o 400%. Druhým způsobem je odtavování materiálu s povrchu obrobku, během kterého je natavený materiál odfukován proudem plynu.

Řezáním paprskem plazmatu můžeme dělit korozivzdorné oceli tloušťky až 130 mm, hliníkové a měděné slitiny tloušťky až 150 mm [16].

Kvalita materiálu řezaného plazmou závisí na proudu a napětí, rychlosti řezání a metodě plazmového řezání [16]. Výhodou je rychlost řezání silných plechů, vyšší kvalita materiálu a kratší čas než při dělení plamenem [13].



Obr. 1.2 Princip PBM metody [13].

Plazmové hořáky s plynovou stabilizací: a) s transferovým obloukem, b) s netransferovaným obloukem, c) vodní stabilizace (1 - hořák, 2 - katoda, 3 - argon, 4 - chlazení, 5 - plazmový paprsek, 6 - obrobek, 7 - přívod vody).

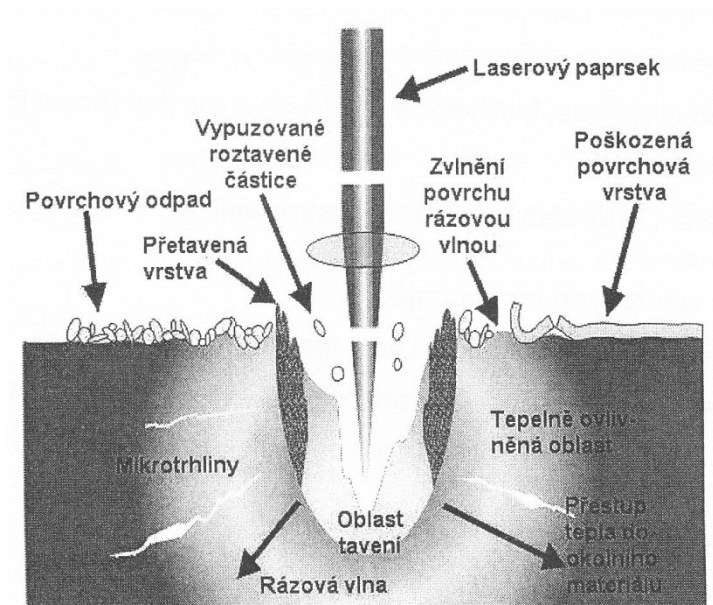
### 1.1.3. Obrábění paprskem laseru LBM

Vznik laserového paprsku je založen na stimulované emisi záření, která vzniká elektromagnetickým zářením na atomu prvku. Elektron obíhá kolem jádra, následně přeskóčí o valenční vrstvu výše, tím vzniká nerovnovážný stav. Při tomto stavu se elektron vrátí zpět do nižší valenční vrstvy a při tomto jevu vyzařuje energii ve formě světla odpovídající fotonu. Dostáváme koherentní světelný paprsek. Ten při dopadu na plochu obráběného předmětu přemění svou světelnou energii na tepelnou, v místě dopadu na materiál může dosáhnout až 10000 °C [13].

LBM nachází využití ve strojírenském průmyslu, laserem lze řezat, vrtat, popisovat, gravírovat, svařovat i použít k mikroobrábění. Laser můžeme využít také v medicíně, kosmetice, zbrojním průmyslu a výpočetní technice [17].

Paprskem laseru dělíme měkké materiály jako plasty, papír, ale také materiály těžkoobrobitelné, jako např. titan a jeho slitiny. Laser může být využíván v kusové i sériové výrobě pro tvarově složité výrobky z plechů tloušťek do 25 mm pro konstrukční oceli, 15 mm u korozivzdorných ocelí a 10 mm plechy ze slitin hliníku. Nejvyužívanější laserová zařízení určená k řezání jsou lasery s CO<sub>2</sub> s výkony dosahujícími až 15 kW [13].

Během řezání dosahujeme velmi tenkého a čistého řezu, dochází k minimálnímu opotřebení nástroje. Obr. 1.3 ukazuje působení laserového paprsku při řezání včetně prostupu tepla.



Obr. 1.3 Laserový paprsek při obrábění [17].

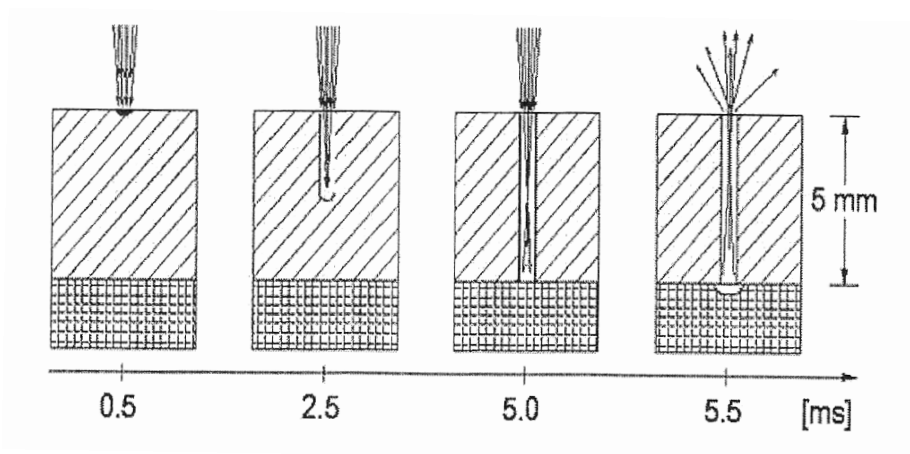
#### 1.1.4. Obrábění paprskem elektronů EBM

Elektronový paprsek je tvořen svazkem urychlených elektronů. Elektrony jsou na plochu obráběného předmětu vrhány velmi vysokou rychlostí. Po dopadu paprsku se jeho kinetická energie vzápětí přemění na tepelnou, která způsobuje tání a následné odpařování materiálu z obrobku. Působení paprsku není pouze tepelné, může působit na materiál také fyzikálními změnami ve struktuře [13].

EBM nachází ve strojírenském průmyslu uplatnění např. při řezání, vrtání, ale také svařování. Díky tomu svařujeme materiály svařitelné obtížně v krajním případě až nesvařitelné. Svařované tloušťky se pohybují v rozmezí 1 - 40 mm. Při vrtání bývají díry vytvářeny rychlostí až 4000 děr za sekundu. Princip vrtání děr pomocí EBM je znázorněn na obr. 1.4.

Opracovávat touto technologií můžeme nejen oceli, které jsou žárovečné, austenitické, využívané k výstavbě reaktorů jaderných elektráren, ale i neželezné kovy, např. bronz, mosaz a zinek [16].

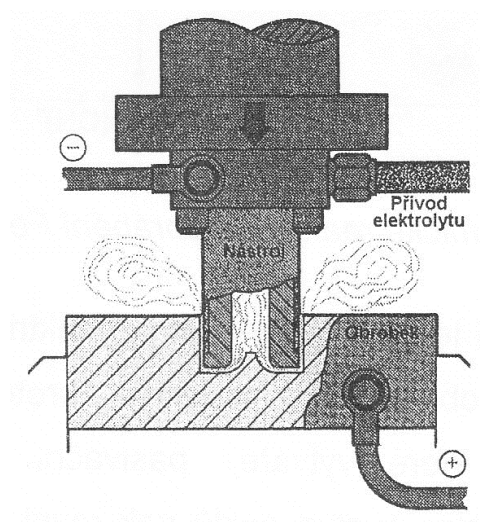




Obr. 1.4 Tvorba děr EBM metodou [17].

### 1.1.5. Elektrochemické obrábění ECM

ECM metoda se zařazuje do beztržiskového obrábění materiálu za působení elektrického proudu. Je důležité, aby materiály byly elektricky vodivé. Způsob obrábění je následující: obrobek (většinou anoda) je ponořen v elektrolytu společně s katodou, která tvoří nástroj. V elektrolytu se za působení stejnosměrného proudu při napětí v rozmezí 5 až 30V slučují kationty elektrolytu a anionty kovu. Tím dochází k následnému rozrušení a úběru materiálu. Vzdálenost mezi elektrodami neboli pracovní mezera musí být minimálně 0,05 až 1 mm. Jako roztok elektrolytu je použito  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{HCl}$  nebo  $\text{NaCl}$  [13]. Průběh elektrochemického obrábění znázorňuje obr. 1.5.



Obr. 1.5 Obrábění metodou ECM [17].

Elektrolyt má za úkol zajistit vedení elektrického proudu, dále určovat podmínky rozpouštění anody a odvádět vzniklé teplo spolu se spaliny. Tyto úkoly s sebou nesou také určité požadavky na elektrolyt, a to zejména dobrou elektrickou vodivost, trvanlivost, apod. [17].

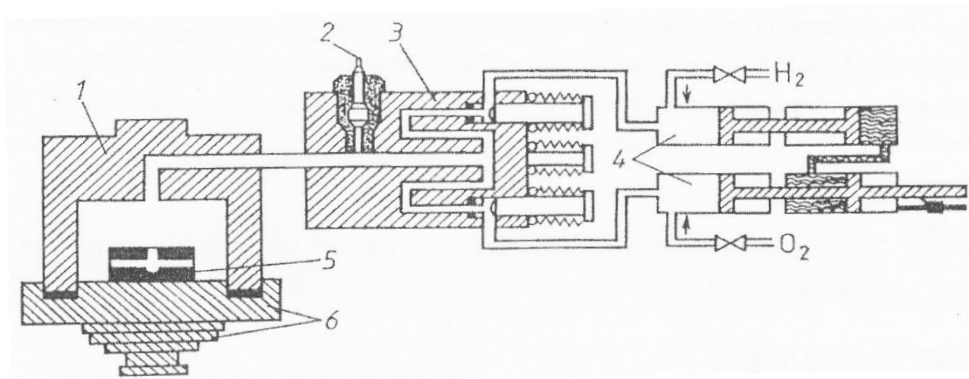
Technologie nachází uplatnění zejména při leštění, povrchovém značení, odstraňování otřepů, hloubení otvorů s malými průměry a mechanickém odstraňování povrchových vrstev materiálů [13].

#### 1.1.6. Chemické obrábění CM

Mezi chemické obrábění můžeme zařadit dvě metody, které jsou pro danou technologii typické. Prvním typem CM obrábění je leptání, kde se jedná o odstraňování vrstvy materiálu z obrobku. Mezi obrobkem a nástrojem, což je většinou hydroxid nebo kyselina, vznikne chemická reakce. Jestliže chceme zabránit leptání povrchu jinde, než na námi požadovaném místě, pak opatříme povrch vrstvou speciálního laku o tloušťce do 2 mm. Jedná se o tzv. masku.

Pomocí leptání opracováváme nejčastěji konstrukční uhlíkové oceli, hliník a jeho slitiny, titan, mosaz, atd. Do těchto materiálů bývají vytvářeny tvarové reliéfy v setinách mm. Další použití je v letectví, při výrobě děr u tenkostěnných trubek apod. [13]. Při obrábění touto CM metodou nevznikají deformace obrobku a nedochází k vnitřnímu pnutí. Slouží pro tvarově složité předměty [17].

Druhým typem chemického obrábění je termické odstraňování otřepů. Odstraňování vzniká v nástroji a uzavřené komoře. Nástroj je utvořen směsí vodíku a kyslíku v poměru 2:1. Ve zmíněné pracovní komoře jsou umístěny předměty, které potřebujeme obrobit. Zde dochází k samotnému procesu odstraňování. Odebírané otřepy shoří v důsledku vysoké teploty dosahující 3500 °C. Po odstranění otřepů obrobky vyjmeme a v ultrazvukové pračce vypereme. Zařízení určené k tomuto procesu vidíme znázorněné na obr. 1.6. U této metody jsou vysoké nároky na přípravu [13]. Metoda je vhodná pro libovolný tvar obrobku, její velkou výhodou je automatizace celého procesu [17]. Odstraňovat otřepy můžeme i v dutinách obrobku. Metoda je vhodná nejen pro kovy ale také pro plastové materiály či gumové předměty.

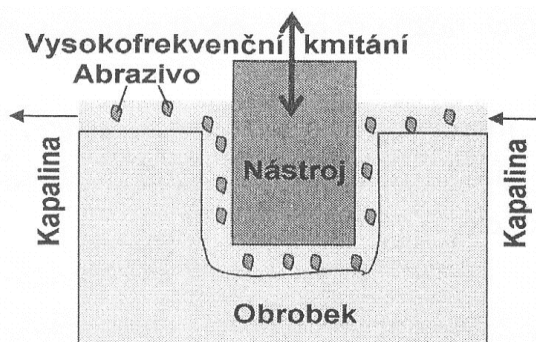


Obr. 1.6 Zařízení sloužící k termickému odstraňování otřepů [16],[17].

(1 - pracovní komora, 2 - zapalovací svíčka, 3 - směšovací komora, 4 - dávkovací mechanismus, 5 - obrobek, 6 - pracovní stůl)

### 1.1.7. Ultrazvukové obrábění USM

Při obrábění vzniká řízené rozrušování materiálu obráběného předmětu. Dochází k tomu pomocí abrazivních zrn přiváděných mezi nástroj kmitající s ultrazvukovou frekvencí v rozsahu 18 až 25kHz a povrch obráběného předmětu. K povrchu předmětu jsou určitou konstantní silou přitlačována abrazivní zrna. Tím se používaný tvar nástroje okopíruje do obráběného předmětu. Aby mohla být zrna přitlačována, musí se nejprve do pracovního prostoru přivést, k tomu slouží pracovní kapalina, nejčastěji líh, strojní olej či petrolej. Proudění kapaliny zaručí obměnu opotřeбенých a rozpadlých zrn a zvyšuje účinek i intenzitu úběru [13]. Obr. 1.7 znázorňuje schéma této metody.



Obr. 1.7 Ultrazvukové obrábění [17].

USM nachází využití při řezání tvrdých materiálů o tloušťce do 5 mm, dále při hloubení dutin ve skleněných a keramických materiálech. Obrábět lze nejen sklo, ale i další tvrdé a křehké materiály. Pro obrábění měkkých materiálů je technologie nevhodná z důvodu tvorby úsad z abrazivních zrn [13].

K nekonvenčním metodám obrábění řadíme také vysokorychlostní vodní paprsek. Vzhledem k tomu, že tato technologie (a zvláště pak její varianta abrazivní vodní mikropaprsek) je předmětem mé bakalářské práce, věnuji této problematice samostatnou kapitulu.

## **2. Vodní paprsek**

### **2.1. Historie vodního paprsku**

První zmínky o využití vody k průmyslovému porušování materiálů pochází z 19. stol. V tomto století byla voda využívána pro těžbu minerálů a drahých kovů. Voda byla využívána k rozrušování horniny a oddělení těžného materiálu; zároveň často sloužila i k dopravě tohoto materiálu na požadované místo. Používaný tlak vody nebyl příliš vysoký, obvykle nepřekročil desítky MPa [6].

Využití vody v hornickém průmyslu rozvíjel tehdejší Sovětský svaz a Nový Zéland při těžbě uhlí. Hornina byla odstřelena a následně přišla na řadu voda o vysokém tlaku, sloužící pro dopravu vytěžené horniny na povrch [6], [15].

V novodobé historii se o výzkum vodního paprsku nejvíce zasloužil Dr. Normand Franz, profesí lesní inženýr. Franz experimentoval v 50. letech minulého století s vysokotlakou vodou při řezání dřeva. Zjistil, že voda o vysokém tlaku přeměněná v trysce na paprsek pohybující se velkou rychlostí je schopna řezat měkké a poloměkké materiály. Jeho zařízení ještě pracovalo přetržitě a životnost nástroje byla jen v minutách. Sám Dr. Franz pro své experimenty ještě nemohl využít žádné komerční zařízení. Jednalo se vždy pouze o laboratorní zařízení [6].

Další milník vývoje vodního paprsku nastal se založením firmy Flow v letech 1970. Společnost vyvinula čerpadla pro získání vysokého tlaku vody s nepřetržitým provozem. Ze začátku byla technologie využívána k řezání měkkých materiálů. Pro řezání tvrdých materiálů bylo zapotřebí určité přísady neboli abraziva. S tímto řešením přichází Dr. Mohamed Hashish, pokládáný za tvůrce abrazivního vodního paprsku. Při experimentech dospěl k závěru, že přidáním abraziva do vysokorychlostního paprsku vody lze dělit všechny známé materiály. Ve spolupráci s firmou Flow uvádí v roce 1980 na trh systém určený k řezání oceli, skla, betonu apod. Od tohoto období dochází k rozšiřování technologie do různých průmyslových odvětví. Taktéž se postupně zvyšuje pracovní tlak vody [1].

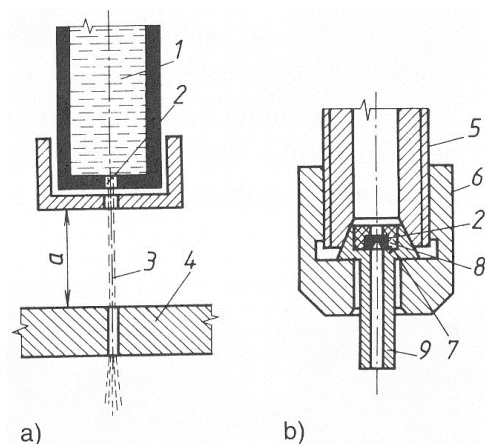
Na konci minulého století dochází k prudkému rozvoji technologie a kromě komerčního využití se začalo vodním a abrazivním paprskům věnovat také několik vědeckých a vývojových pracovišť po celém světě. Z českých vědců se o výzkum a rozvoj technologie vodního paprsku už v 80. letech 20. století nejvíce zasloužil prof. Jaroslav Vašek z Hornického ústavu ČSAV v Ostravě. Toto pracoviště (v současnosti Ústav geoniky Akademie věd ČR) se zaměřuje na využívání a zdokonalování vodního paprsku pro řezání kovů, hornin, betonů a dalších materiálů, ale také například pro čištění, odstraňování povrchových vrstev nebo úpravu povrchů. V současnosti patří mezi světově uznávaná centra výzkumu a vývoje kapalinových paprsků [12].

Jak již bylo naznačeno, existují v zásadě dva typy vysokorychlostních vodních paprsků: čistý vodní paprsek (bez abrazivních přísad) a abrazivní vodní paprsek (s přísadou abraziva). Oběma typům se podrobněji věnuji v následujících kapitolách.

## **2.2. Obrábění paprskem vody WJM**

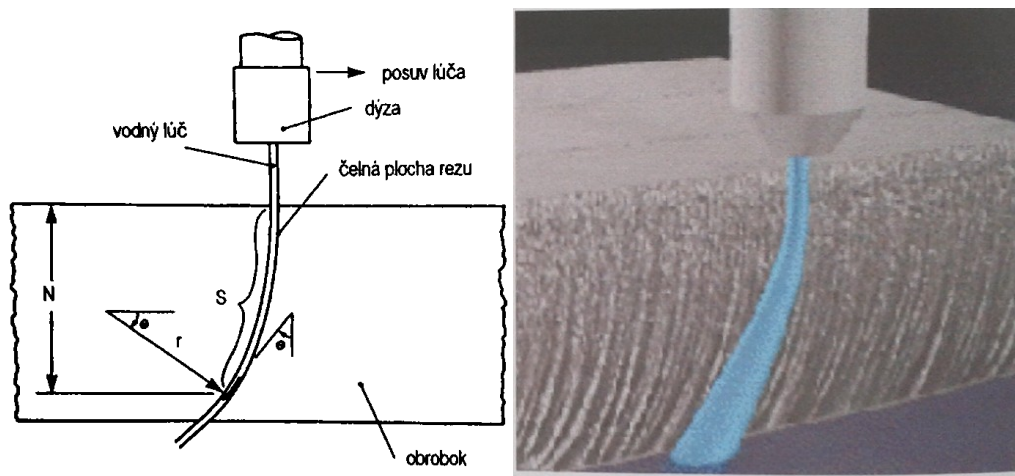
Obrábění paprskem vody se řadí mezi ekologické, efektivní a moderní nástroje k obrábění různých materiálů. Díky WJM nedochází při řezání k ovlivnění materiálu vysokou teplotou, jelikož provádíme studený řez (vodní paprsek po průchodu tryskou dosahuje maximálně 80°C). Můžeme obrábět a řezat široké spektrum materiálů nejen ve strojírenství, stavebnictví, letectví, medicíně, ale i v potravinářském průmyslu. Nevýhodou technologie WJM bývá vznik koroze v místě řezu u materiálů korodujících při styku s vodou. Její vznik můžeme zmírnit použitím různých aditivních přísad. Z důvodu vysokého hluku při obrábění je nutno použít chráničů sluchu.

Princip obrábění závisí na typu vodního paprsku. Voda o vysokém tlaku (až 400 MPa) je vysokotlakým vedením přiváděna do trysky. Po průchodu tryskou malého průměru (obr. 2.1), řádově desetiny mm, je ve formě paprsku nasměrována na obráběný materiál (obrobek). Zde dochází k pronikání do obrobku spojené se snížením rychlosti a zaoblením dráhy paprsku. Ukázka zaoblení paprsku je patrná z obr. 2.2 [7].



Obr. 2.1 Řezací hlava pro WJM: a) schéma, b) provedení výstupní řezací trysky [16].

(1 - tlaková kapalina, 2 - výstupní tryska, 3 - vodní paprsek, 4 - obrobek, 5 - potrubí, 6 – převlečná matice, 7 - lůžko trysky, 8 - držák trysky, 9 - stabilizátor proudu, a - vzdálenost trysky od povrchu obrobku)



Obr. 2.2 Vodní paprsek - ukázka řezání [7].

( $N$  - vzdálenost ve svislém směru, kterou překoná paprsek za čas  $t$ ,  $r$  - poloměr zaoblení paprsku,  $S$  - délka stopy paprsku,  $\theta$  - úhel zaoblení paprsku)

Jako médium pro řezání bývá nejčastěji používána voda, jelikož je snadno dostupná, levná, není agresivní při styku s pokožkou a má vhodné fyzikální vlastnosti. Ve speciálních

případech je však možno použít i jinou kapalinu, tomu je však obvykle nutno přizpůsobit celý řezný systém.

Abychom mohli řezat vodním paprskem, musíme disponovat zařízením k tomu určeném. Toto zařízení se skládá z pohonu čerpadla, o který se stará nejčastěji elektrický či diesellový motor. Další důležitou částí zařízení je vysokotlaké čerpadlo. V zásadě existují dva typy čerpadel: plunžrové (pístové) čerpadlo nebo multiplikátor. Součástí zařízení je také vedení vysokotlaké vody do řezné hlavice, samotná řezná hlavice případně i vhodný manipulátor. Základní schéma zařízení s multiplikátorem tlaku je znázorněno na obr. 2.3 [7],[19].

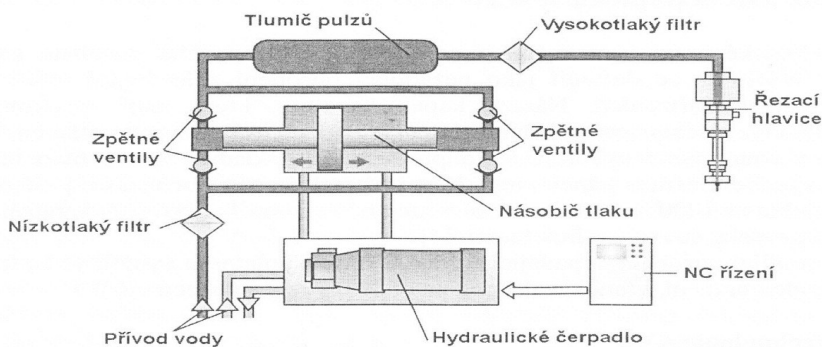
Pomocí multiplikátoru dosáhneme vysokého tlaku potřebného pro řezání. Voda o vysokém tlaku je dopravována vysokotlakými trubkami či pancéřovanými hadicemi, odolávajícími tlaku několik stovek MPa, do vysokotlakého uzavíracího ON/OFF ventilu. Ventil bývá ovládán pneumaticky nebo elektricky a řídí samotné řezání, neboť dodává vodu do řezací hlavice. V řezací hlavici je umístěna tryska vyrobená z diamantu, rubínu nebo safíru o průměru 0,075 - 0,9 mm. Hlavice je nejdůležitější část zařízení WJM technologie, díky níž dokážeme ovlivnit u vodního paprsku jeho kvalitu [7],[19].

Součástí obráběcího zařízení bývá také filtrační systém upravující vodu po řezání. Z vody odstraňuje nečistoty o velikosti 0,5 - 1  $\mu\text{m}$  [7],[19].

Metodu WJM lze využít k řezání měkkých materiálů, dále své využití najde při čištění, odstraňování povlaků, zdrsňování ploch apod. [18].

Zmíněné použití vodního paprsku při čištění a odstraňování starých nátěrových hmot využívají převážně firmy zabývající se stavbou a servisem lodí. Díky vodnímu tryskání docílíme odstranění nátěru z trupu, boku a volných ploch lodě lépe než vzduchovým tryskáním. Tryskání vodním paprskem se využívá v tomto odvětví častěji z ohledu na ekologii [8].

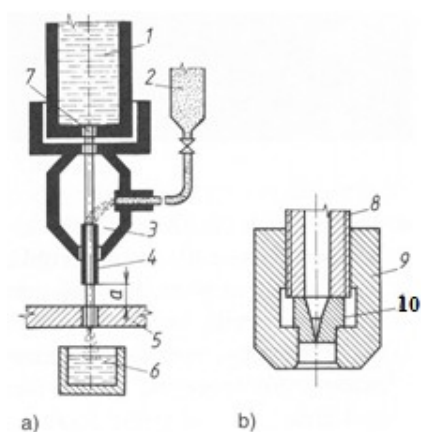
Vodní paprsky se využívají také v občas neobvyklých situacích. Např. japonští vědci použili vysokorychlostní vodní paprsek společně s vibro-kladivem k vytahování ocelových profilů ukotvených hluboko ve skalních oblastech. Metoda využívá vzduch a vodu, které procházejí tryskami tvaru vějíře. Voda porušuje skalní masiv okolo profilů a tím snižuje odpor při jejich vytahování. U tohoto způsobu využití bylo dosaženo podstatného snížení hluku a vibrací [21].



Obr. 2.3 Zařízení pro obrábění WJM technologií [12].

### 2.3. Obrábění abrazivním vodním paprskem AWJM

Způsob obrábění abrazivním vodním paprskem je obdobný technologii WJM, pouze do proudu vodního paprsku je přimícháváno abrazivo. Tyto malé částice můžeme přimíchávat několika způsoby. První způsob smíchání částic abraziva se provádí ve směšovací komoře, která je součástí řezací hlavy (obr. 2.4). K promísení dochází prostřednictvím vysokého tlaku vody, který způsobuje ve směšovací komoře podtlak. Díky němu jsou pak do komory nasávány abrazivní částice. Následně je směs abraziva, vodního proudu a vzduchu v zaostřovací trubici zformována do abrazivního vodního paprsku. Takovýto způsob se nazývá AWJ, jeho schéma je uvedeno na obr. 2.5. Spotřeba abraziva u tohoto paprsku se pohybuje většinou v rozmezí několika desetin  $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$  [7], [19].

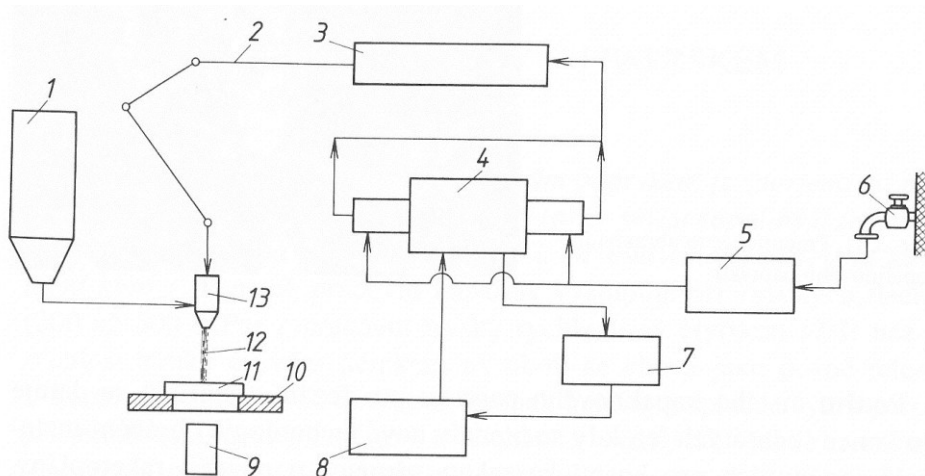


Obr. 2.4 Řezací hlava pro AWJM: a) schéma, b) provedení vodní trysky [16].

(1 - tlaková kapalina, 2 - zásobník s abrazivem, 3 - směšovací komora, 4 - zaostřovací trubice, 5 - obrobek, 6 - lapač, 7 - vodní safírová tryska, 8 - potrubí, 9 - převlečná matice, 10 - vodní tryska, a - vzdálenost trysky od povrchu obrobku)



Systém s přímým dávkováním abraziva je druhým způsobem. Vzniklý vodní paprsek se nazývá suspenzní, ve zkratce ASJ, protože hlavním činitelem je suspenze vody a abraziva, která je stlačena na vysoký tlak a přivedena do speciálně zkonstruované trysky. Abrazivní suspenzní paprsek je oproti abrazivnímu vodnímu paprsku ekonomičtější přesto je méně rozšířen [7],[19].

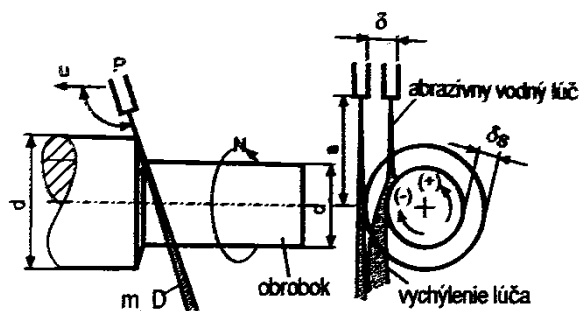


Obr. 2.5 Zařízení pro řezání AWJM technologií [16].

(1 - zásobník s abrazivem, 2 vysokotlaké potrubí, 3 -akumulátor, 4 - vysokotlaké čerpadlo, 5 - filtr, 6 - přívod pracovní kapaliny, 7 - nádrž oleje, 8 - pohon, 9 - lapač, 10 - pracovní stůl, 11 - obrobek, 12 - vodní paprsek, 13 - řezací hlava)

Během řezání abrazivním vodním paprskem lze dosáhnout tlaku až 400 MPa. Což rozšiřuje spektrum jeho využití v průmyslu rozdílného zaměření. Díky této technologii dělíme materiály, ať už měkké nebo tvrdé. Opracovávat a dělit se dá sklo, keramické materiály, kompozity. Abrazivní vodní paprsek využíváme taktéž k vrtání, frézování nebo soustružení. Soustružení pomocí AWJ je znázorněno na obr. 2.6. Další využití AWJ je např. v potravinářském průmyslu, kde se paprsek využívá zejména při dělení, ať už při porcování masa nebo mražených polotovarů. [7].

Abrazivní vodní paprsek lze používat i k čištění a odstraňování vrstev. U tohoto druhu využití musíme pro každou aplikaci paprsku na čištěný povrch zvolit nižší tlak vody. Aby bylo čištění v terénu snadnější, jsou zkonstruovány mobilní agregáty poháněné dieslovým motorem. Tyto agregáty pak můžeme využívat kdekoli [7].



Obr. 2.6 Soustružení AWJ [7].

## 2.4. Abrazivo

Při obrábění abrazivním paprskem musíme dbát na správný výběr abrazivního materiálu - abraziva, jelikož náklady spojené s použitím abraziva se řadí mezi nejnákladnější finanční položku. Jestliže vybíráme vhodné abrazivo bereme na zřetel určité vlastnosti, mezi nimiž zvolíme vždy nejvhodnější. Mezi důležité vlastnosti abrazivního materiálu patří složení, tvrdost, velikost a tvar zrn. Pokud chceme dosáhnout co největší účinnosti během samotného procesu obrábění, zvolíme tvrdší abrazivo. Je však nutno brát v úvahu, že může dojít k nadměrnému opotřebení zaostřovací trubice, kterou prochází abrazivo ještě před vlastním řezáním [7].

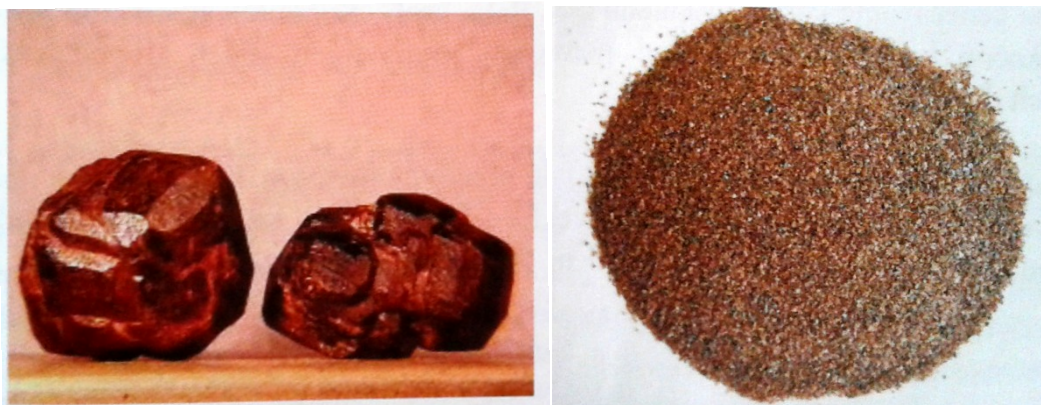
Velikost zrna abraziva volíme podle požadavku na výslednou strukturu povrchu. Při použití částic o malém průměru zvýšíme potřebný čas pro řezání, avšak získáme lepší povrch. Abrazivo jehož velikost vybíráme má své specifické jednotky nazvané MESH. Tato jednotka představuje počet ok síta na jeden palec. Pro představu abrazivní zrna velikosti MESH 80 se rovná zrnům, které dosahuje průměru cca 180  $\mu\text{m}$ .

Mezi další vlastnosti řadíme taktéž tvar zrn. Zde vybíráme zrna kruhovitěho tvaru. Tvar ovlivní výsledný povrch spolu s hloubkou řezu.

Při obrábění AWJ volíme hmotnostní průtok abraziva, kterým se upravuje i zmíněná hloubka řezu. Hloubka řezu závisí přímo úměrně na hmotnostním průtoku abraziva. Dbát však musíme, aby nebyla překročena kritická hodnota hmotnostního průtoku, jelikož při překročení této hodnoty dojde k zmenšení hloubky řezu [7].

U volby abrazivního materiálu bereme v úvahu také ekologické vlastnosti, u kterých dbáme na požadavky bezpečnostní s ohledem na zdraví obsluhy.

Mezi nejčastěji se vyskytující abraziva řadíme granátový písek (obr. 2.7) a olivín, v menší míře i kovové a nekovové strusky. Při použití abrazivního paprsku v potravinářství se jako abrazivo využívají krystalky soli, cukru nebo ledu [7].



*Obr. 2.7 Granátový písek [7].*

### **3. Mikrořezání a mikroobrábění vodním paprskem**

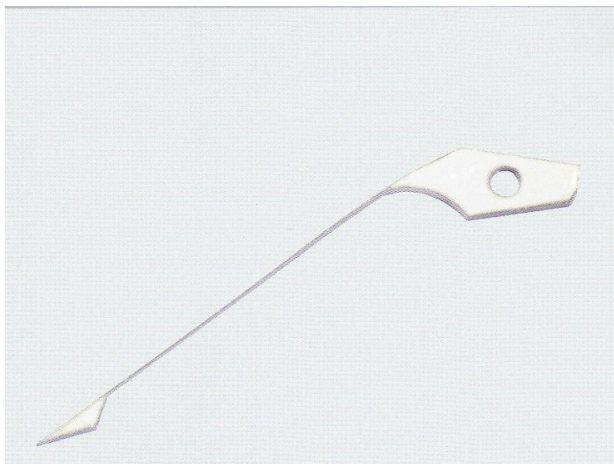
S ohledem na zvyšující se požadavky na přesnost a miniaturizaci obrobků byla postupem času vyvinuta také technologie mikrořezání či mikroobrábění pomocí abrazivního vodního paprsku. Vývoj ještě nebyl zcela ukončen a technologie je stále zdokonalována. O využití vodního paprsku pro mikroobrábění začal uvažovat americký vědec D. S. Miller, který díky svým experimentům zjistil, že při zmenšení průměru trysek dokážeme obrábět malé součásti s velkou přesností. Podle D. S. Millera jsou pro mikroobrábění vhodné vodní paprsky dosahující průměru menšího než 100 $\mu$ m. Taktéž se zabýval kapalinami pro tuto technologii vhodnými. Dospěl k závěru, že pro komerční využití mikroobrábění je nejlepší používat abrazivní vodní paprsek. Miller zhodnotil výhody abrazivního paprsku, užívaného pro mikroobrábění a stanovil, že dlouhodobější výnosy se budou moci rovnat výnosům z běžného užívání abrazivního vodního paprsku [11]. Podle profesora H. T. Liu se může pro mikroobrábění využít také abrazivní suspenzní paprsek, který má až pětkrát vyšší rychlost odstraňování materiálu a taktéž se lépe hodí pro mikroobrábění [9]. Přesto je nejčastěji využíván abrazivní vodní paprsek, jelikož má v této technologii značný potenciál. Ve srovnání s ostatními technologiemi, jako je laser, EDM, ultrazvuk, atd., disponuje jistými

přednostmi, které jsou podobné jako u běžných abrazivních paprsků. K mikroobrábění užíváme efektivní a spolehlivé stroje [11].

Zařízení sloužící k technologii mikrořezání vodním paprskem využívá tlaky od 70 MPa [11]. Nejčastěji se pro řezání kovů používá pracovní tlak 380 MPa. Pro jiné materiály, nekovové, se užívá pracovního tlaku nižšího [5]. Vodní paprsek o tlaku 70 MPa byl uváděn záměrně, z důvodu snížení stlačitelnosti vody na 3%, protože vodní stlačitelnost disponuje prospěšnými, ale i nežádoucími průtokovými jevy. Při velkém objemu abraziva v nádobce a při porovnání s rychlostí objemového proudu vody dochází k stlačení objemu vody v systému. To trvá jen několik sekund. Pokud se změní tlak vody, změní se i vodní stlačitelnost. To může vést ke změně směru průtoku v některých částech. Tím se abrazivní částice mohou dostat do obvodu s čistou vodou. Tomuto jevu pronikání částic abraziva do jiného obvodu s čistou vodou se musí zabránit. Proto bylo navrženo speciální ovládání a obvody průtoku vody [11].

Natlakováním zásobníku lze zabránit kavitaci vody na vstupní straně čerpadla. Vodovodní potrubí obsahuje vlastní 0,5  $\mu\text{m}$  filtr, kterým je vhodné chránit čerpací jednotku od kavitace vody v potrubí [11].

Za vznikem vysoce přesné technologie mikroobrábění stojí mnoho faktorů, jako jsou snížení nákladů, zkrácení výrobního času a fakt, že během obrábění nevznikají žádné výpary, kouř ani zápach. Mikroobrábění je obrábění za studena, což neumožní žádné změny ve struktuře materiálu, nedochází k pnutí ani kroucení. Během samotného procesu nedochází k deformacím řezaného materiálu, proto si můžeme dovolit obrábět materiály tloušťky až 0,05 mm. Jestliže budeme řezat např. pero do hodin (obr. 3.1) z pružinové oceli, vlastnosti materiálu a požadována tloušťka pružiny 0,1 mm jsou nezměněné a výrobek je bez ostřin. Další výrobky bez ostřin lze vidět také na obr. 3.9. Výhodou mikroobrábění vodním paprskem je efektivnost, která se projevuje při výrobě otvorů. U otvorů nemusíme předvrtávat zahajovací otvory jako např. u EDM. Vzniklé otvory jsou velmi přesné, rychlé vytvořené a bez mikroskopických trhlin. Technologií lze vytvářet také různé kontury ve výrobku. Technologie je vhodná i pro nevodivé a tvrdé materiály. Technologie je univerzální, jelikož při procesu řezání využíváme pouze jeden nástroj. U materiálu nedochází ke změně barvy v místě řezu, tzn. je zachována také barevná stálost [5].



*Obr. 3.1 Ukázka výrobku - péro do hodin.*

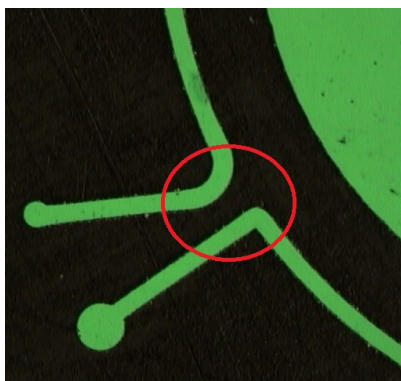
Vodním mikropaprskem dosahujeme při obrábění přesností v rozmezí  $\pm 10\mu\text{m}$ . Abychom dosáhli této přesnosti, musíme mít odpovídající řezací zařízení. Řezací zařízení bývá složeno z několika komponent, závislých na výsledné přesnosti obrábění. Hlavní komponenta je rám řezacího zařízení, který je vyroben jako celek odlitý z minerálního betonu, čímž je zaručena stabilita a tuhost soustavy. Rám stroje je celý opláštěný oplechováním. Další komponenta zařízení je portálový nosník s řezací hlavicí a odměřovacími skleněnými pravítky. Dráha pohybu portálového nosníku je v ose X a Y. Poslední komponentou zařízení je samostatná nerezová vana umístěna v pracovním prostoru. Aby byla dosažena zmiňovaná přesnost, bývá nerezová vana vybavena filtračním zařízením, které se stará nejen o přefiltrování ale hlavně ochlazování vody na teplotu  $20^{\circ}\text{C}$ . K samotnému zařízení patří dále vysokotlaké čerpadlo (multiplikátor) propojené s řezacím zařízením pancéřovanými hadicemi odolávajícími vysokému tlaku, kterými se do stroje přivádí řezací médium, nejpoužívanější je sladká voda. Stroj je znázorněn na obr. 3.2 [5].



Obr. 3.2 Řezací zařízení s využitím abrazivního vodního mikropaprsku.

### 3.1. Počítačové řízení mikrořezání

Vlastní proces řezání je řízen pomocí počítačového programu. V programu si nastavíme vlastnosti řezaného materiálu a rychlost řezání, ze které pak vyplyne kvalita řezu. Dále si nastavíme tloušťku a rozměr polotovaru, druh abraziva, průměr trysek, směr řezání (zleva nebo zprava, z vnější nebo vnitřní strany) a velikost tzv. můstku. Můstek (obr. 3.3) je část materiálu, která zaručí, že po vyřezání součástky nedojde k jejímu oddělení od polotovaru a spadnutí do nerezové vany s vodou [5].



Obr. 3.3 Můstek při řezání mosazi.



### 3.2. Abrazivo k mikrořezání

Granátový písek je nejrozšířenější abrazivo jak pro abrazivní vodní paprsky, tak pro mikrořezání [11]. Tento přírodní granát pochází většinou z USA. Nejčastěji se v mikroobrábění vyskytují a využívají zrnitosti 300, 220 a 120 MESH [5]. Jako další druh byl testován i oxid hlinitý [11].

Pro tuto technologii je nutné používat abrazivo malých velikostí. Také nesmíme dovolit, aby docházelo ke kontaminaci abraziva. Toho dosáhneme zaváděním zásobníků na abrazivo [11].

### 3.3. Zásobník na abrazivo

Zásobník se skládá z nádoby, ve které je umístěno abrazivo, další částí zásobníku jsou pak přívodní hadice. Těmi je abrazivo přiváděno do řezací hlavice. Zásobník může být doplňován periodicky, kdy je ve víku zásobníku otvor opatřený šroubením a k němu je upevněna přívodní hadice. V hadici se abrazivo přemísťuje z hlavního zásobníku do zásobníku umístěného nad řezací hlavicí. Další možnost doplňování je manuálně. Tento způsob doplňování se využívá častěji, jelikož při spotřebě abraziva  $40 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  náplň v zásobníku vydrží cca 30 min. Hlavní zásobník je znázorněn na obr. 3.4 a zásobník nad řezací hlavicí na obr. 3.5 [5].



Obr. 3.4 Hlavní zásobník s abrazivem.



*Obr. 3.5 Zásobník s abrazivem nad řezací hlavici.*

### 3.4. Trysky

Používají se dva druhy trysek a to vodní tryska a zaostřovací trubice. Vodní trysky určené pro mikroobrábění vodním paprskem bývají vyráběny z diamantu, safíru a korundu. K výrobě zaostřovací trubice je nejvíce užíván tvrdokov odolný vůči opotřebení a slinuté karbidy, např. karbid křemíku. Trysky stále podléhají vývoji. Cílem je vyvinutí trysek s dlouhou životností [11]. V praxi se vyskytují vodní trysky o průměru desetin až setin mm. Nejpoužívanějšími průměry pro zaostřovací trubice jsou 0,2; 0,3 a 0,5 mm [5].

Vodní tryska je umístěna nad směšovací komorou, kde dochází k mísení abraziva a řezacího média (vody). Životnost vodní tryšky pro mikrořezání se uvádí cca 8 hodin provozu, po této době se vymění. Orientační cena této tryšky je ve stovkách korun.

Zaostřovací trubice se nachází za směšovací komorou. Trubicí již prochází smísené abrazivo s vodou. Životnost zaostřovací trubice se uvádí cca 15 hodin provozu. Po životnosti je nutné trubici vyměnit a nahradit novou, jelikož paprsek už nemá požadovaný tvar. Na obrázku obr. 3.6 je znázorněn otvor v zaostřovací trubici po své životnosti. Orientační cena zaostřovací trubice se uvádí cca osm tisíc korun. Životnost všech uvedených trysek je sledována řídicím systémem řezacího zařízení [5].





*Obr. 3.6 Zaostřovací trubice po své životnosti.*

### **3.5. Obráběné materiály**

Abrazivním vodním mikropaprskem lze obrábět široké spektrum materiálů, které jsou nerozpustné ve vodě. Tímto způsobem můžeme obrábět či řezat železné i neželezné kovy, různé nevodivé materiály, plasty, pěny, potraviny apod. Lze obrábět i vzácné kovy jako je zlato a stříbro, dále nové moderní materiály jejich představiteli jsou keramické materiály, kompozitní materiály, sklolaminát, karbonové vlákno, kevlar a materiály se sendvičovou strukturou. Taktéž se touto technologií obrábějí materiály křehké jako slída, grafit a pěnový hliník. Mikroobrábění vodním paprskem se využívá i v medicíně při výrobě přesně opracovaných obrobků. Na výrobu nástrojů pro lékařské účely se využívá titan, hořčík a keramika, které musí být bez jakéhokoliv znečištění. Výrobky z titanu (obr. 3.7) tloušťky 4 mm spolu s následným zvětšením jsou uvedeny na obrázku obr. 3.8. Pro toto odvětví lze řezat i biokompatibilní materiály se složitými konturami s velkou přesností [5].



*Obr. 3.7 Ukázka obrobku z titanu tloušťky 4 mm.*



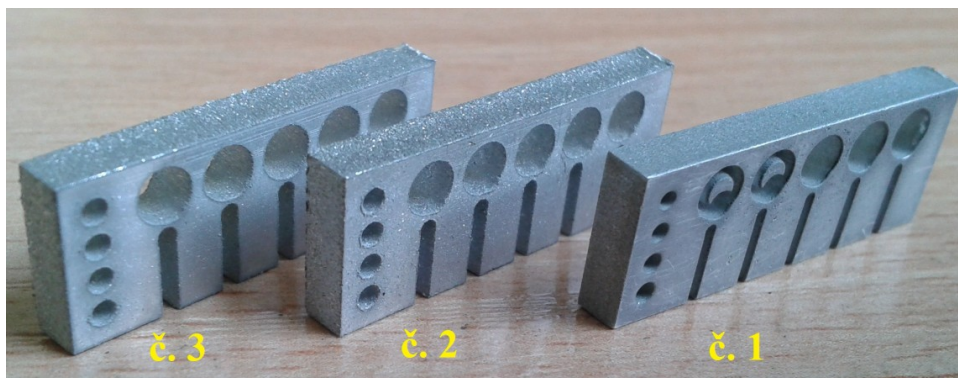
*Obr. 3.8 Vzorek z titanu tloušťky 4 mm - zvětšení.*



*Obr. 3.9 Výrobky z titanu tloušťky 4 mm, 1mm a z mosazi bez ostrin- zvětšené.*

## 4. Experimentální část

Experimentální část obsažená v bakalářské práci je zaměřena na srovnání některých parametrů vzorků řezaných mikroabrazivním a abrazivním vodním paprskem. Porovnávány byly celkem tři vzorky. Vzorek č. 1 byl vyřezán mikroabrazivním vodním paprskem. Zbývající dva vzorky vznikly při řezání abrazivním vodním paprskem, vzorek č. 2 byl vyřezán stejnými parametry řezání jako u mikropaprsku a vzorek č. 3 byl vyřezán při nastavení parametrů obdobných jako při řezání standardním abrazivním vodním paprskem. Řezané vzorky jsou vyobrazeny na obrázku obr. 4.1. U všech vzorků se srovnávaly rozměry vytvořených průstřelů, otvorů a drážek. U drážek se kromě šířky měřil úkos, kterého se docílilo během průchodu paprsku materiálem. Výsledkem experimentální části je zhodnocení naměřených parametrů a rozhodnutí o použitelnosti mikroobrábění abrazivním vodním paprskem při výrobě malých a přesných obrobků. Je nutno poznamenat, že pro mikrořezání i standardní řezání abrazivním vodním paprskem bylo použito stejné vysokotlaké a polohovací zařízení, u mikrořezání pak byla použita jiná řezná hlavice s parametry zhruba odpovídajícími hlavici speciálně určené pro mikrořezání. Mikropaprsek tedy nebyl testován na zařízení, které by bylo výhradně určeno k mikrořezání. Nebylo tudíž dosaženo parametrů, přesnosti a kvality řezného povrchu takové, jaké jsou od mikrořezání požadovány. Pro ukázkou změn sledovaných parametrů obrobku při změně parametrů paprsku pro účely bakalářské práce však zcela postačuje.



Obr. 4.1 Ukázka řezaných vzorků: č. 1 - abrazivní mikropaprsek, č. 2 - abrazivní vodní paprsek - stejné parametry řezání, č. 3 - abrazivní vodní paprsek - odlišné parametry řezání.

#### 4.1. Testované vzorky

Za účelem srovnání výše zmíněných rozměrových a tvarových parametrů vzorků byly vyřezány celkem tři vzorky ze slitiny hliníku, všechny o stejném rozměru 26 x 10 x 3 mm v požadovaném tvaru (viz obr. 4.1). Uvedené tři vzorky byly vyřezány z jednoho kusu materiálu nesoucího označení EN AW – 6060, dle chemického složení EN AW - AlMgSi. Materiál s tímto značením je slitina hliníku s dalšími přísadami, jejichž obsah v této slitině je uveden v tabulce tab. 1. Hodnoty přísadových prvků jsou doloženy z normy EN 573 - 3.

Tab. 1. Chemické složení řezaných vzorků [2], [3].

Chemické složení - Hliník EN AW 6060												
Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	Ostatní
Hodnota [%]	0,3 - 0,6	0,1 - 0,3	0,1	0,1	0,35 - 0,6	0,05	-	0,15	-	-	0,1	0,15

Základním prvkem této slitiny je hliník, který dodává slitině stříbrné zbarvení. Samotný hliník se používá ve všech odvětvích průmyslu. Vyskytuje se např. v potravinářském průmyslu jako fólie nebo dále ve strojírenském průmyslu, kde jsou z hliníku vyráběny plechy, trubky a tyče různého průřezu. Nejvíce je hliník rozšířen v dopravním průmyslu, kde je zastoupen 59% podílem celkové spotřeby. Oblast dopravy zahrnuje letecký a automobilový průmysl, kolejovou dopravu, konstrukci lodí a kosmonautiku. V automobilovém průmyslu se využívá k výrobě šasi automobilu i pro části motoru. Hliník disponuje vlastnostmi, díky nimž se hojně využívá i v elektrotechnice [10].

Použitá slitina hliníku EN AW - 6060 se vyznačuje určitými mechanickými vlastnostmi, které jsou stanoveny normou EN 755 - 2 uvedenými v tabulce tab. 2. Díky těmto vlastnostem je vhodné slitinu využít v letectví, stavebnictví, pro jemnou mechaniku. Slitina se vyznačuje dobrou svařitelností, lešitelností a tvárností. Tvárná je při vyšších teplotách okolo 500°C. Vyznačuje se také vynikající odolností vůči korozi.

Tab. 2. Mechanické vlastnosti materiálu řezaných vzorků [4].

Mechanické vlastnosti	
Hliník EN AW 6060	
Mez pevnosti Rm [MPa]	190
Mez kluzu Rp 0,2 [MPa]	150
Tažnost A [%]	8
Tvrdost dle Brinella HBW	70

## 4.2. Použité řezací zařízení

Řezání bylo prováděno na pracovišti Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., s použitím řezacího zařízení českého výrobce PTV. Řezací zařízení bylo tvořeno řezacím stolem CNC WJ2020B-1Z-D a vysokotlakým multiplikátorovým čerpadlem PTV JETS 75/60c vyvozuujícím tlak potřebný k řezání. Parametry použitého multiplikátoru a řezacího stolu jsou uvedeny v tabulkách tab. 3 a tab. 4.

Tab. 3 Parametry řezacího stolu [12].

Řezací stůl PTV CNC WJ 2020B-1Z-D	
Pracovní rozsah	
Osa x (mm)	2000
Osa y (mm)	2000
Osa z (mm)	300
Max. posuvová rychlost (m.min <sup>-1</sup> )	75
Rozlišení nastavení os stroje (mm)	0,001
Přesnost nastavení polohy (mm)	0,03
Rozměry stroje	
Délka (mm)	2500
Šířka (mm)	2500
Výška (mm)	2250
Hmotnost (kg)	5000

Tab. 4 Parametry čerpadla [14].

Čerpadlo PTV JETS 75/60c	
Multiplikátor model H <sub>2</sub> O (ks)	2
Max. pracovní tlak (MPa)	415
Elektrický příkon (kW)	75
Množství řezací vody (l.min <sup>-1</sup> )	7,5
Elektromotor	Siemens
Hydraulické čerpadlo	Parker, dvojité
Řízení	PLC
Počet tlakových úrovní	10, přepínatelné (9 tlaků + 0)
Max. hmotnost (kg)	2000
Max. hloubka (mm)	1430
Max. šířka (mm)	1890
Max. výška (mm)	1720
Min. tlak vstupní vody (bar)	3,5
Max. tlak vstupní vody (bar)	6
Náplň hydraulického oleje (l)	200
Typ hydraulického oleje	HM 46

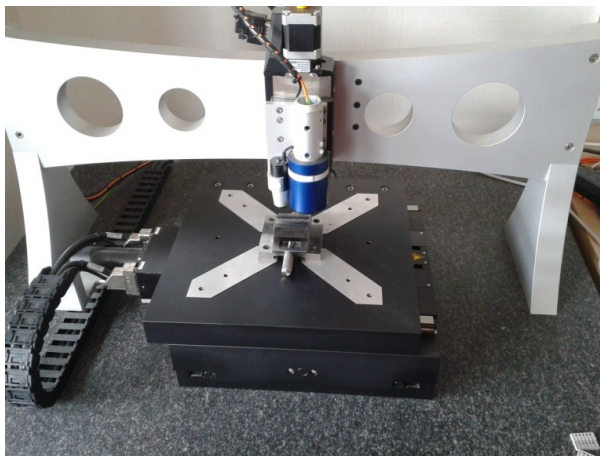
Během řezání se prováděly určité změny v nastavení řezných parametrů spojené s instalací hlavice určené pro mikrořezání s jiným průměrem trysek. Hlavici určenou pro mikrořezání vodním paprskem byly vytvořeny průstřely, otvory a drážky ve vzorku č. 1. Celý vzorek č. 1 byl touto hlavicí taktéž vyřezán.

Následovala demontáž hlavice pro mikrořezání a instalace hlavice pro řezání abrazivním paprskem. Tato záměna řezacích hlavic sebou nesla také obměnu abraziva v zásobníku. Nespotřebované abrazivo určené k mikrořezání o zrnitosti 200 MESH od výrobce Barton bylo ze zásobníku odebráno. Před nasypáním musel zásobník projít očišťujícím procesem, který zahrnoval i odstranění abraziva z přívodní hadice umístěné na vstupu do směšovací komory. Po vyčištění se do zásobníku nasypal australský granát o zrnitosti 80 MESH. Nastavily se požadované parametry a uskutečnil se kontrolní řez, během kterého se hlavice seřídila.

Abrazivní hlavicí byly vyřezány vzorky č. 2 a č. 3. Každý ze vzorků se vyřezával rozdílnou rychlostí, rozdílným tlakem a v odlišných časových intervalech byly vytvářeny otvory.

#### 4.3. Měření rozměrů vzorků

Pro zjištění velikosti průstřelů, otvorů a šířky drážek bylo použito zařízení založené na optické profilometrii, jelikož běžnými měřidly se žádné hodnoty nepodařilo zjistit. Použitý přístroj MicroProf FRT (obr. 4.2) je založen na bezkontaktním měření materiálu. Abych mohl měřit rozměry naskenovaných vzorků, použil jsem k analýze firemní software SPIP.

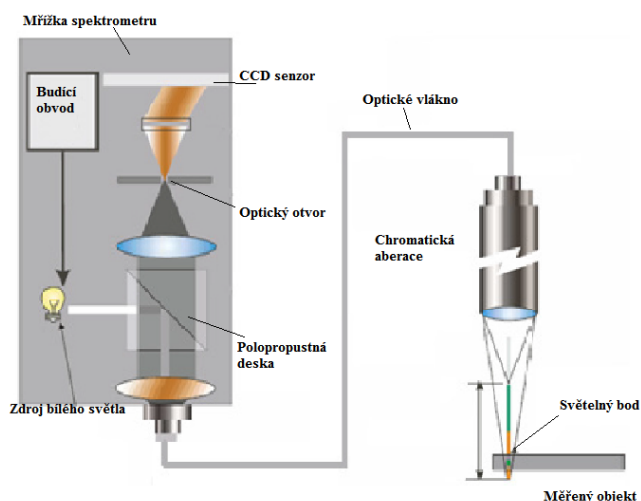


Obr. 4.2 Optický profilometr MicroProf FRT.



Profilometr obsahuje měřicí senzor. Princip jeho činnosti může být založen na monochromatickém nebo bílém zdroji světla. K měření rozměrů v mé bakalářské práci jsem použil přístroje s bílým zdrojem světla využívající chromatickou aberaci čočky. Samotné měření probíhalo za současného pohybu X-Y odměřovacího stolu, kterému byla udělena určitá rychlost. Odměřovací stůl je vybaven čelistmi pro upnutí vzorku [22].

Princip měření je následující: ze světelného zdroje je přes optický hranol s polopropustnou deskou ke spojné čočce vysíláno bílé světlo (obr. 4.3). Spojná čočka snímá monochromatické složky bílého světla v různé výšce nad vztažnou rovinou. Při dopadu světla na měřený povrch je světlo odraženo zpět do čočky a optickým vláknem přivedeno do spektrometru. Tím získáváme snímek povrchu vzorku sestavený z bodů rastrováním topografie povrchu a zaznamenáním délkových a výškových pozic. Přesnost metody je udávána jako hustota bodové sítě vznikající nad vztažnou rovinou. Běžné přístroje udávají vzdálenost jednotlivých bodů řádově 100 nm až 10  $\mu\text{m}$  [22].

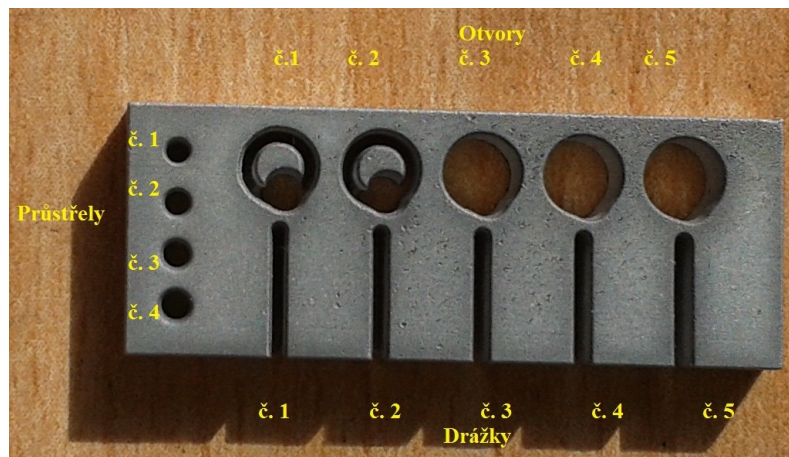


Obr. 4.3 Princip profilometru [22].

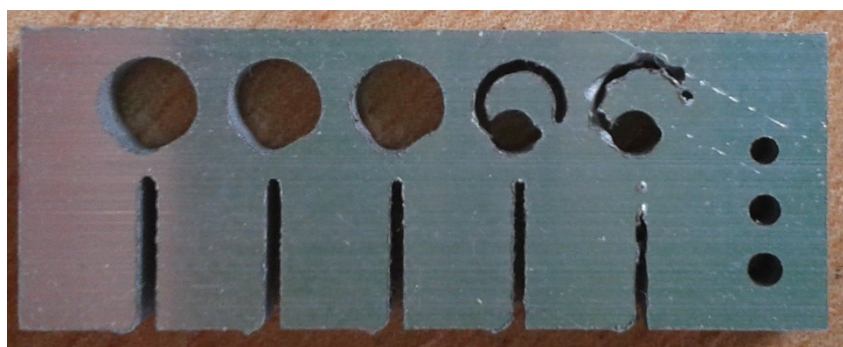
#### 4.4. Mikrořezání vzorku č. 1

Hlavičí určenou k mikrořezání se ze slitiny hliníku vyřezal vzorek č. 1 o rozměru 26 x 10 x 3 mm. Ve vzorku jsou vytvořeny čtyři průstřely (otvory), které vznikly působením paprsku na jednom místě po různou dobu (10, 20, 40, 80 s) - viz obr. 4.4. Těleso vzorku pak obsahuje

pět otvorů a pět drážek, které byly vytvořeny postupným snižováním rychlosti paprsku. Každý otvor i každá drážka byly řezány jinou rychlostí (150, 120, 90, 60, 30 mm.min<sup>-1</sup>). Na vzniklém vzorku je patrný utvořený úkos a také některé neprůchozí otvory při pohledu ze spodní strany (obr. 4.5).



Obr. 4.4 Vzorek č. 1 - vrchní strana.



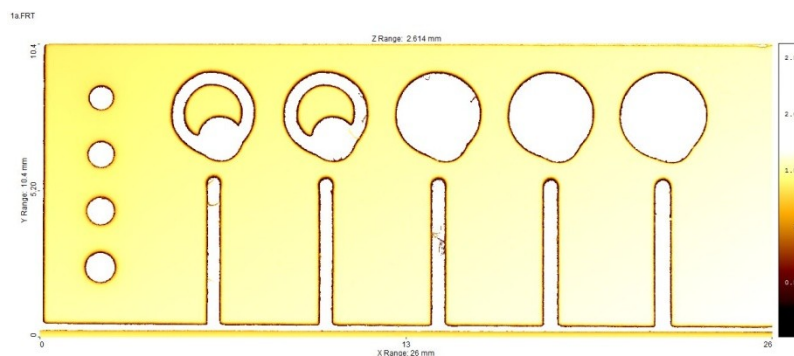
Obr. 4.5 Vzorek č. 1 - spodní strana.

Pro řezání byly nastaveny určité parametry paprsku. Hodnota tlaku se nastavila na 200 MPa, za abrazivní materiál se použil granát Barton o zrnitosti 220 MESH s průtokem 40 g.min<sup>-1</sup>. Řezná hlavice obsahovala vodní trysku průměru 0,15 mm a zaostřovací trubici o průměru 0,5 mm. Výška zaostřovací trubice nad materiálem se nastavila na hodnotu 2 mm. Ve vzorku postupně vznikaly průstřely, drážky a otvory. Celý vzorek se vyřezal konstantní obvodovou rychlostí 100 mm.min<sup>-1</sup>. Vyřezaný vzorek se odebral z řezacího zařízení a vzniklé otvory se přeměřily optickým profilometrem, jehož princip je popsán v předešlé kapitole (kap. 4.3).

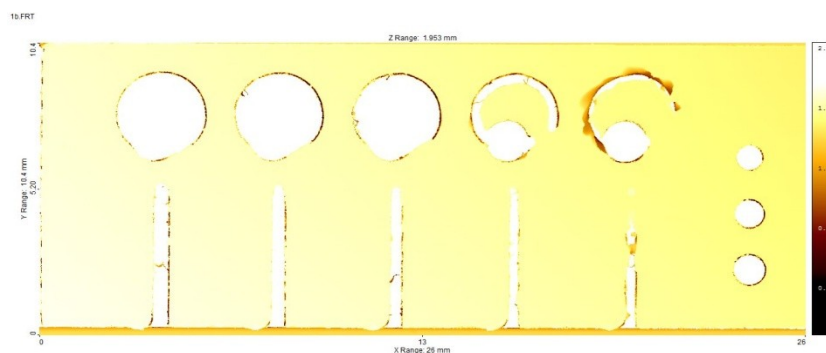
Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v přehledných tabulkách (tab. 5 až tab. 10) na následujících stranách společně s naskenovanými stranami vzorku (obr. 4.7 a obr. 4.8).



Hodnoty se získávaly z vrchní a spodní strany vzorku. Z naměřených výsledných hodnot z obou stran vzorku se vytvořily tři grafy znázorňující vždy určitou závislost.



Obr. 4.6 Sken vzorku č. 1 - vrchní strana.



Obr. 4.7 Sken vzorku č. 1 - spodní strana.

#### 4.4.1. Naměřené rozměry vzorku č. 1

Tab. 5 Šířka drážky vzorku č. 1 - vrchní strana

Šířka drážky - vrchní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledná šířka (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	0,44	0,462	0,505	0,469	+/- 0,027
2.	120	0,44	0,44	0,462	0,447	+/- 0,010
3.	90	0,484	0,484	0,462	0,477	+/- 0,010
4.	60	0,505	0,484	0,484	0,491	+/- 0,010
5.	30	0,571	0,549	0,549	0,556	+/- 0,010

Tab. 6 Šířka drážky vzorku č. 1 - spodní strana

Šířka drážky - spodní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledná šířka (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	0,321	0,258	-	0,290	+/- 0,032
2.	120	0,321	0,279	0,196	0,265	+/- 0,052
3.	90	0,382	0,362	0,32	0,355	+/- 0,026
4.	60	0,465	0,403	0,403	0,424	+/- 0,029
5.	30	0,506	0,486	0,486	0,493	+/- 0,009

Tab. 7 Průměr otvorů vzorku č. 1 - vrchní strana

Průměr otvorů - vrchní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	2,98	2,86	2,89	2,910	+/- 0,051
2.	120	2,95	2,93	3	2,960	+/- 0,029
3.	90	2,95	2,95	2,99	2,963	+/- 0,019
4.	60	2,92	3,02	2,94	2,960	+/- 0,043
5.	30	3,01	3,01	3,11	3,043	+/- 0,047

Tab. 8 Průměr otvorů vzorku č. 1 - spodní strana

Průměr otvorů - spodní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	2,98	-	-	2,980	+/- 0,000
2.	120	2,91	2,89	-	2,900	+/- 0,010
3.	90	2,9	2,8	2,85	2,850	+/- 0,041
4.	60	2,99	2,87	2,9	2,920	+/- 0,051
5.	30	3,01	2,96	2,99	2,987	+/- 0,021

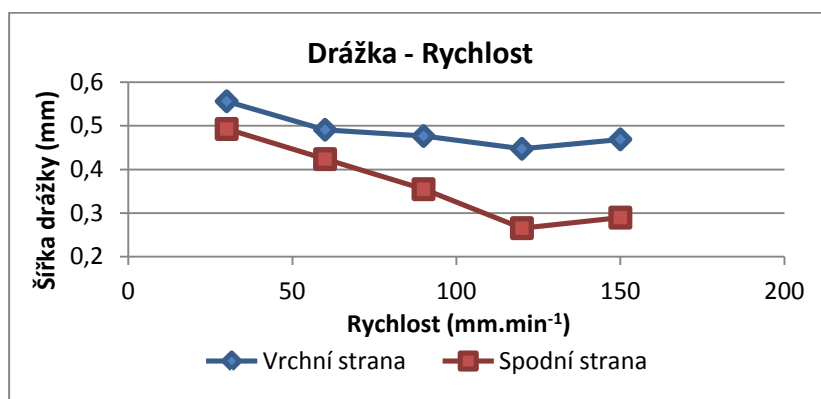
Tab. 9 Průměr průstřelů vzorku č. 1 - vrchní strana

Průměr průstřelů - vrchní strana						
Pozice	Čas (s)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	10	0,879	0,858	0,849	0,862	+/- 0,013
2.	20	0,923	0,923	0,918	0,921	+/- 0,002
3.	40	0,967	0,989	0,98	0,979	+/- 0,009
4.	80	1,05	1,03	1,12	1,067	+/- 0,039

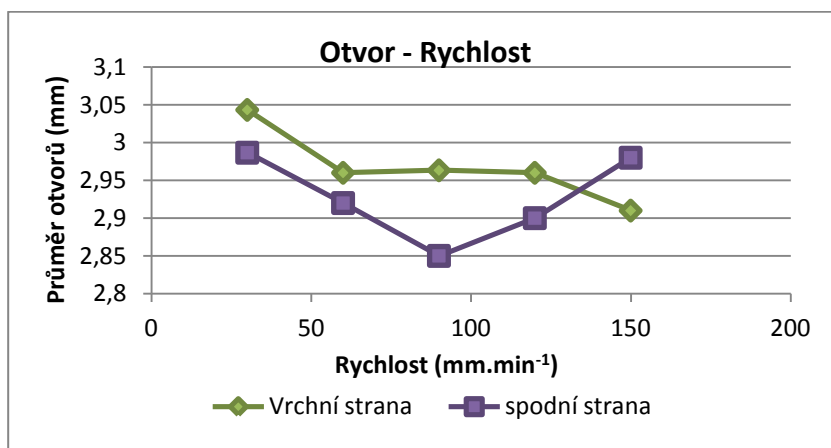
Tab. 10 Průměr průstřelů vzorku č. 1 - spodní strana

Průměr průstřelů - spodní strana						
Pozice	Čas (s)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	10	-	-	-	-	-
2.	20	0,841	0,837	0,848	0,842	+/- 0,005
3.	40	1,01	0,961	0,957	0,976	+/- 0,024
4.	80	1,09	1,05	1,07	1,070	+/- 0,016

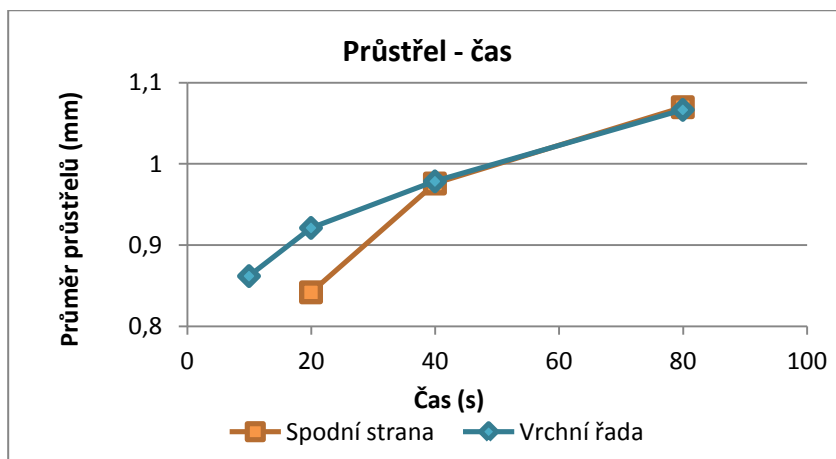
#### 4.4.2. Grafy - vzorek č. 1



Graf 4.1 Závislost šířky drážky na rychlosti řezání mikropaprskem - vzorek č. 1



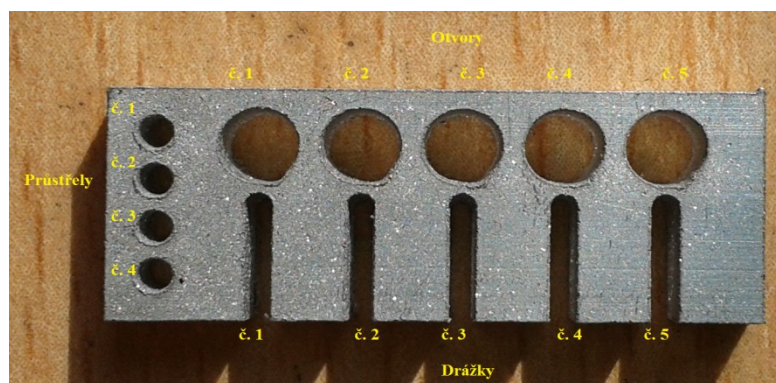
Graf 4.2 Závislost průměru otvoru na rychlosti řezání mikropaprskem - vzorek č. 1



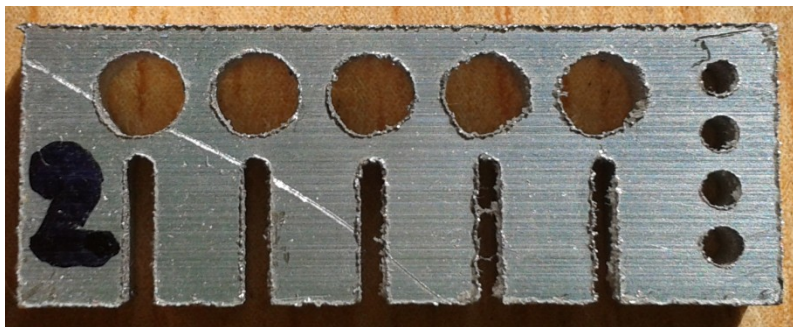
Graf 4.3 Závislost průměru průstřelu na době působení mikropaprsku - vzorek č. 1

#### 4.5. Řezání vzorku č. 2 abrazivním vodním paprskem

Vzorek č. 2 (obr. 4.8 a obr. 4.9) byl vytvořen standardní hlavicí pro řezání abrazivním vodním paprskem. Provedla se demontáž původní hlavice a montáž standardní abrazivní hlavice, s tím souvisela i změna určitých řezných parametrů v systému řezacího zařízení. Hodnota tlaku zůstala zachována, tzn. 200 MPa a taktéž byl zachován průtok abraziva ( $40 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Byl použit jiný abrazivní materiál, předchozí abrazivo bylo nahrazeno Australským granátem o zrnitosti 80 MESH. Průměr vodní trysky se zvětšil na 0,33 mm a průměr zaostřovací trubice na 0,9 mm. Vzdálenost zaostřovací trubice byla ponechána na původní hodnotě (2 mm).



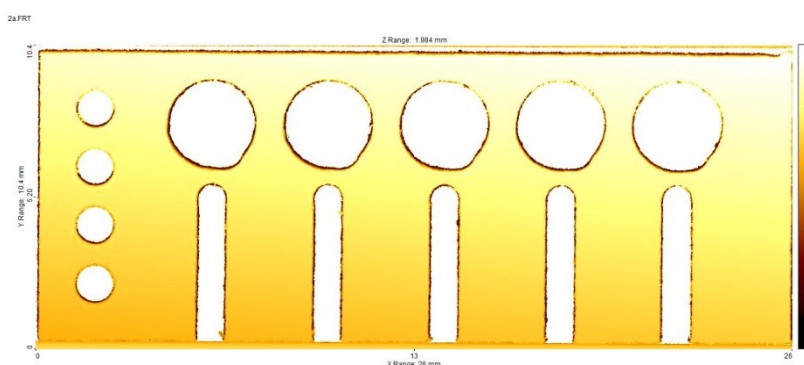
Obr. 4.8 Vzorek č. 2 - vrchní strana.



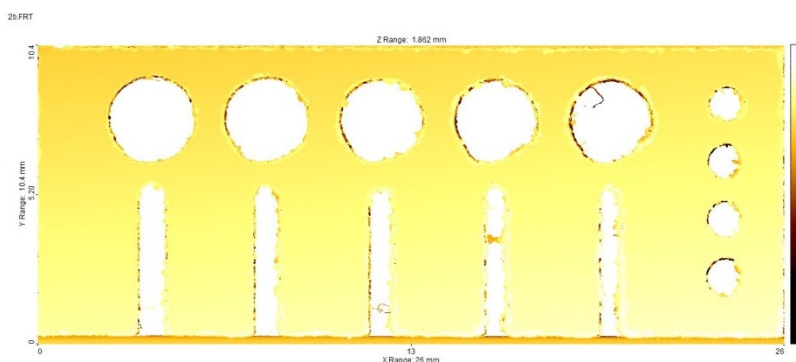
Obr. 4.9 Vzorek č. 2 - spodní strana.

Průstřely vzorku č. 2 byly opět vytvořeny v časech 10, 20, 40 a 80 s. Otvory a drážky vznikaly podobně jako u mikrořezání, tedy postupným snižováním rychlosti ( $150, 120, 90, 60$  a  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Samotný vzorek č. 2 se vyříznul z polotovaru opět konstantní obvodovou rychlostí  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Vyřezaný vzorek se podobně jako v předešlém případě (u mikrořezání) naskenoval a proměřil na profilometru a hodnoty byly zaznamenány do tabulek (tab. 11 až tab. 16). Naskenováním vznikl sken vrchní a spodní strany vzorku (obr. 4.10 a obr. 4.11). Taktéž byly vytvořeny grafy. Vše uvedeno níže v pořadí scan vzorku, tabulky s hodnotami a grafy.



Obr. 4.10 Sken vzorku č. 2 - vrchní strana.



Obr. 4.11 Sken vzorku č. 2 - spodní strana.

### 4.5.1. Naměřené hodnoty vzorku č. 2

Tab. 11 Šířka drážky vzorku č. 2 - vrchní strana

Šířka drážky - vrchní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledná šířka (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	0,897	0,897	0,897	0,897	+/- 0,000
2.	120	0,916	0,916	0,916	0,916	+/- 0,000
3.	90	0,936	0,956	0,916	0,936	+/- 0,016
4.	60	0,956	0,956	0,956	0,956	+/- 0,000
5.	30	0,996	0,976	0,976	0,983	+/- 0,009

Tab. 12 Šířka drážky vzorku č. 2 - spodní strana

Šířka drážky - spodní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledná šířka (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	0,604	0,583	0,496	0,561	+/- 0,047
2.	120	0,453	0,583	0,518	0,518	+/- 0,053
3.	90	0,583	0,604	0,496	0,561	+/- 0,047
4.	60	0,755	0,69	0,755	0,733	+/- 0,031
5.	30	0,863	0,885	0,863	0,870	+/- 0,010

Tab. 13 Průměr otvorů vzorku č. 2 - vrchní strana

Průměr otvorů - vrchní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	2,95	2,93	2,9	2,927	+/- 0,021
2.	120	2,93	2,91	2,95	2,930	+/- 0,016
3.	90	2,99	2,95	2,94	2,960	+/- 0,022
4.	60	2,97	2,93	2,95	2,950	+/- 0,016
5.	30	3,05	3,01	2,99	3,017	+/- 0,025

Tab. 14 Průměr otvorů vzorku č. 2 - spodní strana

Průměr otvorů - spodní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	150	2,76	2,81	2,62	2,730	+/- 0,080
2.	120	2,74	2,77	2,67	2,727	+/- 0,042
3.	90	2,85	2,72	2,77	2,780	+/- 0,054
4.	60	2,8	2,88	2,8	2,827	+/- 0,038
5.	30	2,96	2,98	2,93	2,957	+/- 0,021

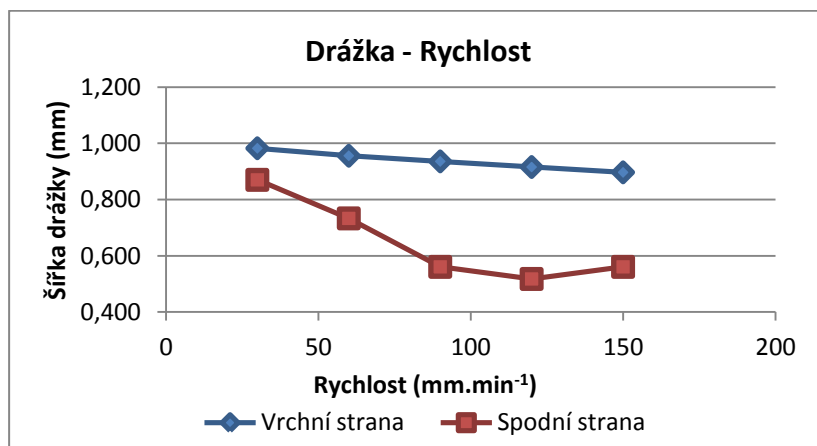
Tab. 15 Průměr průstřelů vzorku č. 2 - vrchní strana

Průměr průstřelů - vrchní strana						
Pozice	Čas (s)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	10	1,22	1,16	1,17	1,183	+/- 0,026
2.	20	1,22	1,2	1,2	1,207	+/- 0,009
3.	40	1,22	1,16	1,2	1,193	+/- 0,025
4.	80	1,24	1,2	1,2	1,213	+/- 0,019

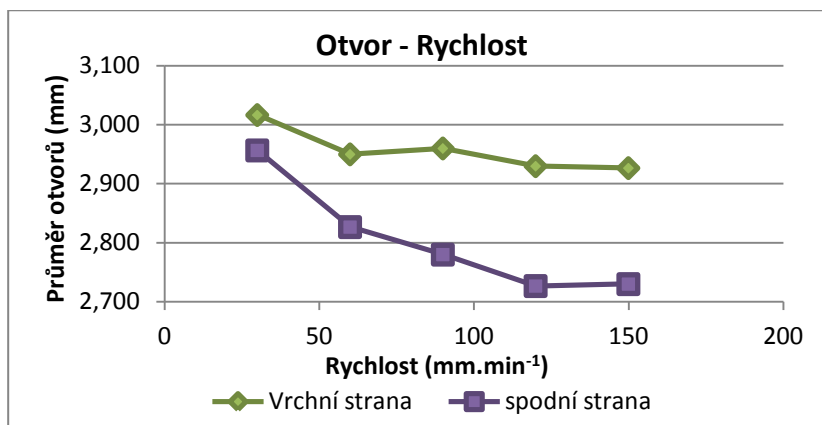
Tab. 16 Průměr průstřelů vzorku č. 2 - spodní strana

Průměr průstřelů - spodní strana						
Pozice	Čas (s)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	10	1,1	1,12	0,951	1,057	+/- 0,075
2.	20	1,04	1,12	0,959	1,040	+/- 0,066
3.	40	1,1	1,17	1,1	1,123	+/- 0,033
4.	80	1,17	1,25	1,08	1,167	+/- 0,069

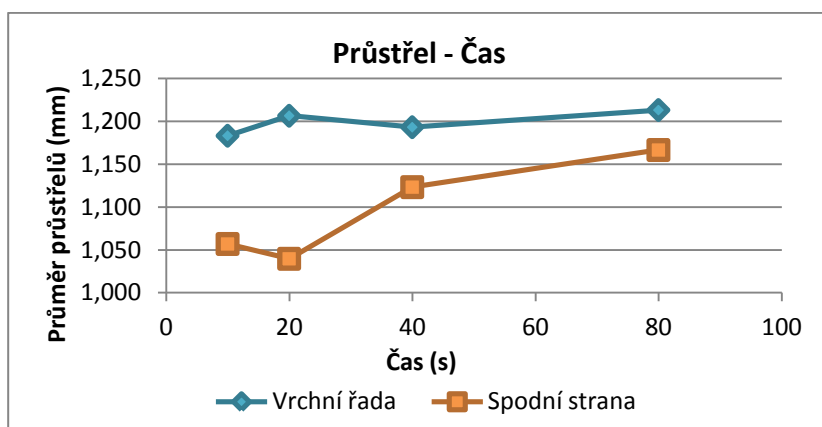
#### 4.5.2. Grafy - vzorek č. 2



Graf 4.4 Závislost šířky drážky na rychlosti řezání abrazivního paprsku - vzorek č. 2



Graf 4.5 Závislost průměru otvoru na rychlosti řezání abrazivního paprsku - vzorek č. 2

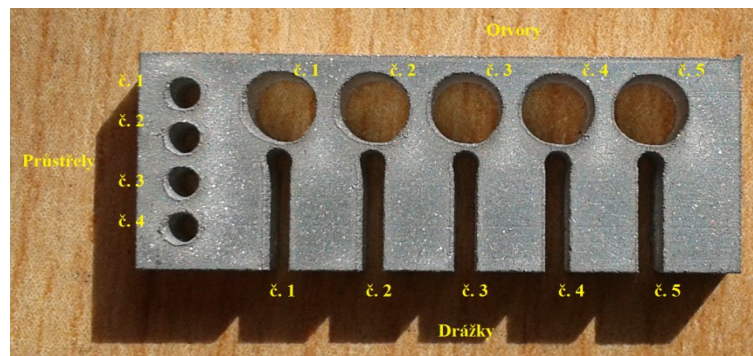


Graf 4.6 Závislost průměru průstřelu na době působení abrazivního paprsku - vzorek č. 2

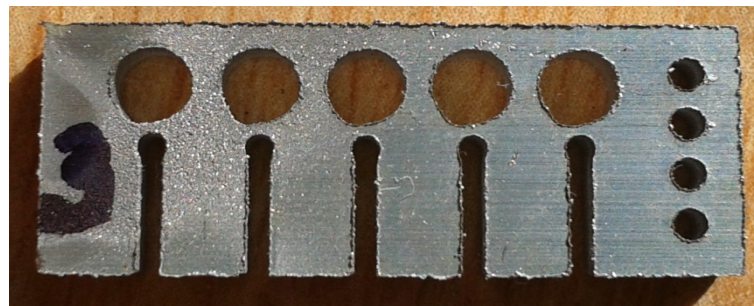
#### 4.6. Řezání vzorku č. 3 abrazivním vodním paprskem

Při tvorbě vzorku č. 3 (obr. 4.12 a obr. 4.13) bylo snahou vyřezat tento vzorek standardní abrazivní řeznou hlavici s parametry paprsku běžně užívanými pro tuto technologii. Tlak potřebný pro řezání se tedy zvětšil na dvojnásobek - 400 MPa. Změna se dotkla i průtoku abraziva, zde se hodnota nastavila na 300g.min<sup>-1</sup>. Zásadní změnou při řezání třetího vzorku prošla rychlost, která byla po celou dobu řezu konstantní a byla nastavena na hodnotu 1500 mm.min<sup>-1</sup>. Taktéž se změnil časový interval u všech průstřelů – všechny otvory byly vytvořeny za 2 s.



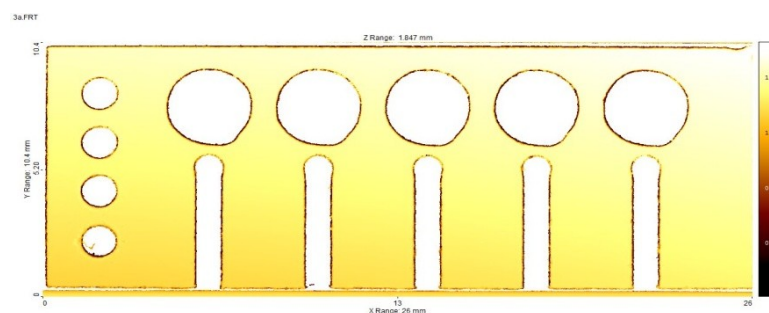


Obr. 4.12 Vzorek č. 3 - vrchní strana

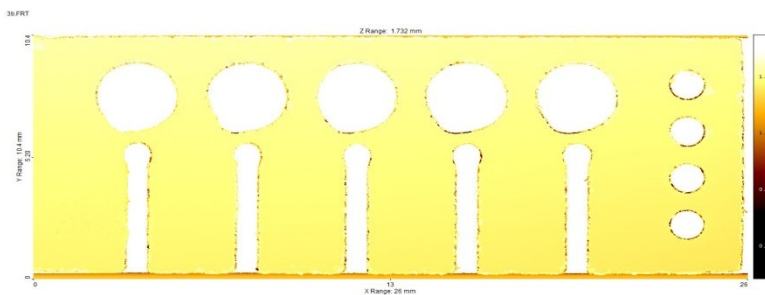


Obr. 4.13 Vzorek č. 3 - spodní strana

Vzorek č. 3 prošel stejnou cestu od skenování až po proměření jako předešlé vzorky č. 1 a č. 2. Jednotlivé skenované plochy jsou znázorněny na obrázcích obr. 4.14 a obr. 4.15. Ze skenu vzorku se odečetly a do tabulek (tab. 17 až tab. 22) uvedly naměřené hodnoty. Vzhledem k tomu, že časy průstřelů a rychlost řezání otvorů a drážek byla v tomto případě shodná pro všechny průstřely, otvory a drážky, byl vždy proměřen pouze jeden průstřel, otvor a jedna drážka.



Obr. 4.14 Sken vzorku č. 3 - vrchní strana.



Obr. 4.15 Sken vzorku č. 3 - spodní strana.

#### 4.6.1. Naměřené hodnoty vzorku č. 3

Tab. 17 Šířka drážky vzorku č. 3 - vrchní strana

Šířka drážky - vrchní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledná šířka (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	1500	0,905	0,905	0,95	0,920	+/- 0,021

Tab. 18 Šířka drážky vzorku č. 3 - spodní strana

Šířka drážky - spodní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledná šířka (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	1500	0,775	0,714	0,755	0,748	+/- 0,025

Tab. 19 Průměr otvoru vzorku č. 3 - vrchní strana

Průměr otvorů - vrchní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	1500	3,03	2,99	3,06	3,027	+/- 0,029

Tab. 20 Průměr otvoru vzorku č. 3 - spodní strana

Průměr otvorů - spodní strana						
Pozice	Rychlost (mm/min)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	1500	2,93	2,91	2,86	2,900	+/- 0,029

Tab. 21 Průměr průstřelu vzorku č. 3 - vrchní strana

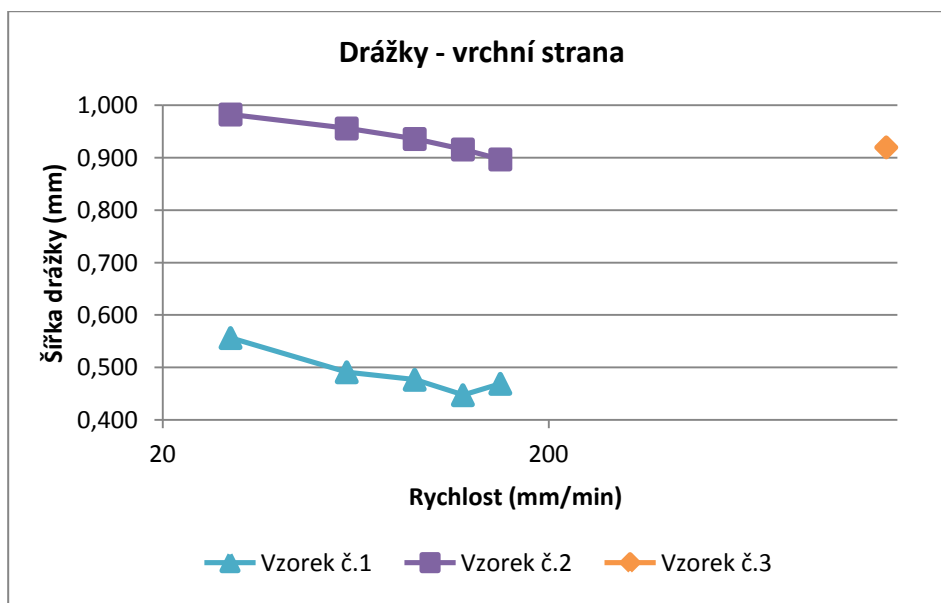
Průměr průstřelů - vrchní strana						
Pozice	Čas (s)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	2	1,24	1,22	1,22	1,227	+/- 0,009

Tab. 22 Průměr průstřelu vzorku č. 3 - vrchní strana

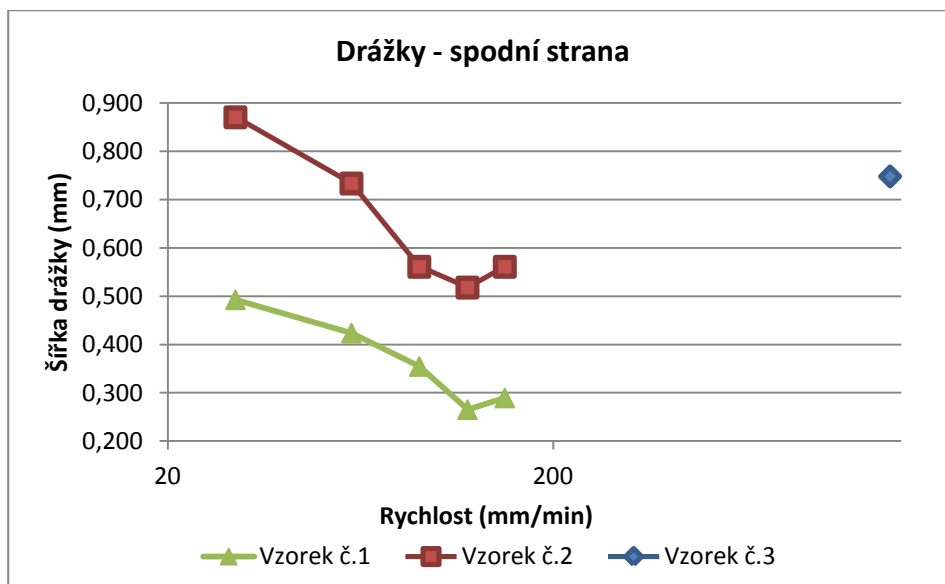
Průměr průstřelů - spodní strana						
Pozice	Čas (s)	Měření (mm)			Výsledný průměr (mm)	Odchylka (mm)
		1	2	3		
1.	2	1,22	1,2	1,18	1,200	+/- 0,016

#### 4.6.2. Grafy - porovnání drážek

V této části bakalářské práce jsou porovnány šířky drážek u vzorku vytvořeného hlavicí pro mikrořezáním (vzorek č. 1) se vzorky vytvořenými standardní abrazivní řeznou hlavicí, ovšem s parametry paprsku shodnými s mikrořezáním (vzorek č. 2) a klasickým abrazivním vodním paprskem s běžně užívanými parametry (vzorek č. 3). Aby bylo z grafu možné pozorovat rozdíly je rychlost paprsku zadána v logaritmických souřadnicích, z důvodu širokého rozpětí mezi hodnotami řezných rychlostí u jednotlivých vzorků.



Graf 4.7 Porovnání vrchních rozměrů drážek

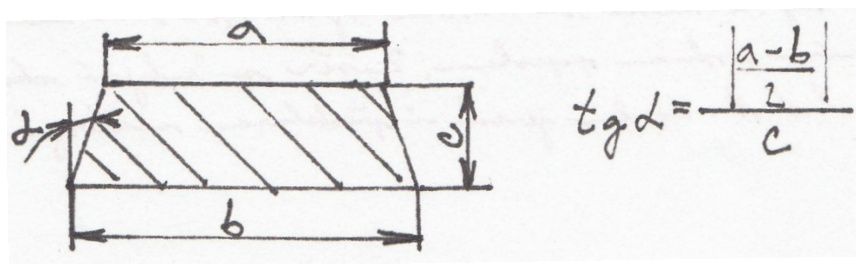


Graf 4.8 Porovnání spodních rozměrů drážek

#### 4.7. Stanovení úkosů

Úkosy řezné plochy vznikají nejen při řezání vodním a abrazivním paprskem, ale také u mikroabrazivního vodního paprsku. Sklon úkosu je udáván v rozmezí  $1 - 1,5^\circ$ . Prvního případu docílíme u měkkých materiálů, kdy se při pomalém řezu projeví kuželovitý tvar paprsku také v řezné spáře, která se v dolní části rozšiřuje (negativní úkos). Další případ nastane u tvrdého materiálu při velmi rychlém řezání: vodní paprsek nedokáže vytvořit kolmou řeznou stěnu a řezná drážka se v dolní části zužuje (pozitivní úkos). Za optimální se považuje řez, kdy rychlost řezu, tloušťka a tvrdost řezaného materiálu jsou ve vzájemné rovnováze. Tím nedochází ke vzniku úkosu [12],[20]. V bakalářské práci bylo zjišťováno, zda nějaký úkos vznikl a pokud ano, jak velký.

Abychom zjistili úkosy na vytvořených vzorcích, bylo potřeba vzorky přeměřit a využít vzorce k následnému výpočtu. Úhel vzniklého úkosu se ve vzorci vypočítá pomocí goniometrické funkce tangens (obr. 4.16). Do vzorce se dosadí rozdíl horního a spodního rozměru vzorku nebo drážky vydělený tloušťkou materiálu. Úkosy se měřily po obvodu vzorků (tab. 23) a ve vytvořených drážkách (tab. 24, tab. 25, tab. 26).



Obr. 4.16 Vzorec pro výpočet úkosů [12].

(*a* - průměrná vrchní hodnota, *b* - průměrná spodní hodnota, *c* - tloušťka materiálu).

Tab. 23 Naměřené úkosy na obvodu vzorků

Vzorek	č. 1	č. 2	č. 3
Úkos (°)	0°11'28''	0°57'17''	0°57'17''

Tab. 24 Úkosy v drážce vzorku č. 1

Drážka	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
Úkos (°)	1°42'32''	1°44'15''	1°9'54''	0°38'34''	0°36'28''

Tab. 25 Úkosy v drážce vzorku č. 2

Drážka	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
Úkos (°)	3°12'19''	3°47'42''	3°34'35''	2°7'43''	1°4'44''

Tab. 26 Úkosy v drážce vzorku č. 3

Drážka	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
Úkos (°)	1°38'31''	1°10'16''	1°34'10''	1°27'6''	1°47'20''

## 5. Zhodnocení výsledků

### 5.1. Celkový vzhled, přítomnost otřepů

Při porovnání jednotlivých vzorků z pohledu tvorby otřepů docházíme k výsledku, že vzorek č. 1 při tomto srovnání vypadá nejlépe. Projevila se zmiňovaná výhoda mikrořezání vodním paprskem, kdy nedochází k tvorbě ostřin neboli otřepů. U vzorku č. 1 se objevují pouze ze spodní strany ve dvou drážkách v důsledku neprořezání.

Kvalita řezné plochy je výrazně ovlivněna nejen řeznou rychlostí, ale také použitou zrnitostí abraziva. Z těchto důvodů je struktura řezné plochy u mikrořezání jemnější a méně drsná (viz obr. 4.1) než u ostatních vzorků. Pomalá rychlost řezání a jemnější abrazivo přispělo ke kvalitnější řezné ploše zejména ve spodní části.

### 5.2. Průstřely

Průstřely vzniklé u vzorku č. 1 se z vrchní strany (obr. 4.4) utvořily všechny v rozdílných průměrech, což bylo dáno dobou působení paprsku. Při pohledu na vzorek se u žádného průstřelu nevytvořil otřep. U průstřelů s delší dobou působení paprsku je možné pozorovat jakési zaoblení horní hrany. Pokud vzorek pozorujeme ze spodní strany (obr. 4.5), lze vidět vznik pouze tří průstřelů, které jsou podle naměřených hodnot (tab. 9 a 10) v některých případech o něco menší. Chybějící průstřel se nevytvořil z důvodu zvoleného kratšího času působení paprsku, který neměl dostatek času vzorek prostřelit (provrtat). Závislost času potřebného k vytvoření průstřelů je patrná z grafu 4.3. U vzorku č. 2 se průstřely vytvářely v časových intervalech shodných jako u mikrořezání. Při pohledu na vrchní stranu (obr. 4.8) vzorku č. 2 jsou vidět na okrajích otřepy a průstřely disponují skoro shodným průměrem (tab. 15). Při otočení a pohledu ze spodní strany (obr. 4.9 a 4.11) spatříme znovu otřepy, ale také všechny průstřely. Rozdíl průměru mezi vrchní a spodní stranou vzorku je patrný nejen z naměřených hodnot (tab. 15 a 16), ale také z grafu 4.6, na němž je největší výkyv při působení paprsku po dobu 20 s. Průstřely ve vzorku č. 3 vznikaly působením paprsku po dobu 2 s. Vzhledem k použitému paprsku a nastaveným parametrům jsou průstřely z vrchní (obr. 4.12) a ze spodní (obr. 4.13) strany téměř shodné. Taktéž se vyskytují otřepy z obou stran.

Srovnáme-li průstřely u všech tří vzorků z pohledu tvorby ostřin, nejlépe vychází vzorek vytvořený mikrořezáním, protože průstřely jsou bez ostřin a můžeme docílit průstřelů malých

průměrů. Je však nutno podotknout, že u tohoto vzorku se nevytvořily všechny průstřely jako průchozí. Abychom docílili průchozích průstřelů, musíme upravit některé parametry řezání.

### 5.3. Drážky

Srovnáme-li vyřezané drážky u vzorku č. 1 řezaného mikrořezáním vidíme na vrchní straně (obr. 4.4) utvořené všechny drážky. Při bližším pohledu je možno zjistit, že se snižováním rychlosti dochází k rozšiřování vzniklé drážky, což je patrné i z naměřených hodnot (tab. 5). Pohlédneme-li na vzorek z jeho spodní strany (obr. 4.5), uvidíme tentýž jev rozšiřování drážek během snižování rychlosti paprsku. U drážky č. 1 nedošlo k prořezání po celé její délce. I když jsou patrné náznaky prořezání, mikropaprsek již neměl dostatečnou energii k vytvoření požadovaného rozměru drážky. Trend zužování drážky při rostoucí rychlosti řezu lze vidět i v grafu 4.1.

Drážky ve vzorku č. 2 jsou již na první pohled širší. Z vrchní strany (obr. 4.8) se po okraji drážek utvářejí nepatrné otřepy. Pohlédneme-li na spodní stranu vzorku (obr. 4.9), pak u drážek č. 1 až č. 3 se otřepy vyskytují ve větší míře. Rozměr drážek se ze spodní strany v důsledku velkého úkosu (tab. 24) zmenšil, což znázorňují naměřené hodnoty (tab. 12) a uvedený graf 4.4.

Veškeré drážky u vzorku č. 3 byly vyřezány stejnou rychlostí, proto jsou šířky všech drážek zhruba stejné ať už z vrchní strany (obr. 4.12) nebo ze spodní strany (obr. 4.13). U drážek se projeví otřepy ve větší míře ze spodní strany vlivem vysoké rychlosti řezání a použitého hrubšího abraziva.

### 5.4. Otvory

V neposlední řadě porovnáme vzniklé otvory. Při pohledu na vrchní stranu vzorku č. 1 (obr. 4.4) je zřejmé, že otvory č. 1 a č. 2 obsahují zbytek materiálu ve tvaru půlměsíce. To znázorňuje vstup neboli začátek řezání paprskem, tento zbytek také signalizuje neúplné prořezání otvorů. Průměry všech otvorů jsou téměř shodné. Tvar otvorů není pravidelně kruhový, ale oválný. Totéž lze pozorovat ze spodní strany (obr. 4.5), kde jsou patrné nedokončené otvory č. 1 a č. 2. Ovalita otvoru je způsobená paprskem v místě, kde vstupuje do materiálu a také končí řez. Abychom tomuto jevu zamezili, musíme provést nejprve průstřel zhruba uprostřed otvorů a následně vodním paprskem utvořit otvor požadovaného průměru. V grafu 4.2 můžeme vidět podobnost zjištěných rozměrů z vrchní a spodní strany.

Otvory ve vzorku č. 2 obsahují otřepy z obou stran (obr. 4.8 a 4.9), ze spodní strany více patrné. Ovalitu otvoru lze pozorovat převážně ze spodní strany vzorku. Odchyšky v průměru otvoru mezi vrchní a spodní stranou jsou patrné z grafu 4.5. Je zde opět zřetelná závislost změny rychlosti na výsledném průměru.

Zmiňovaná ovalita se vyskytla i u posledního vzorku č. 3 z obou stran (obr. 4.12 a 4.13). Průměry otvorů se zde shodují ve všech případech z vrchní i spodní strany s určitou zanedbatelnou odchylkou.

Při porovnání otvorů řezaných mikro a abrazivním vodním paprskem lze říci, že otvory vytvořené mikropaprskem jsou přesnější, ale je nutno vhodně upravit parametry řezání tak, aby se eliminoval vznik otřepů a dosáhla požadovaná kvalita řezné plochy.

Porovnáme-li celkově mezi sebou rozměry drážek všech tří vzniklých vzorků, ať už ze spodní strany nebo z vrchní strany vzorku, nejpřesnější jsou drážky, které byly zhotoveny mikropaprskem. Tento výsledek je znázorněn v grafu 4.7 a 4.8. Z grafu je taktéž patrné, že velikost drážek vzorku č. 3, řezaných vysokou rychlostí abrazivním vodním paprskem, se nacházejí v rozmezí vzorku č. 2.

## 5.5. Úkosy

Při srovnání úkosů vzniklých po obvodu vzorku, které jsou uvedeny v tab. 23 je vidět, že při mikrořezání dosahuje úkos hodnoty  $11'23''$ , zatímco u vzorku č. 2 a č. 3 řezaných abrazivním paprskem se úkos v obou případech ustálil na hodnotě  $57'17''$ . Zde se projevuje další výhoda mikrořezání. Vznik úkosu v drážkách je důkazem poklesu energie vodního paprsku, ke které došlo během průchodu materiálem. Nejpodobnější hodnoty úkosu (tab. 26) v drážkách jsou ve vzorku č. 3, které byly vyřezávány shodnou rychlostí. Můžeme říci, že drážky č. 4 a č. 5 u vzorku č. 1 jsou téměř bez úkosu, jelikož došlo ke snížení rychlosti.



## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s abrazivním vodním paprskem určeným pro mikrořezání a porovnat mezi sebou vzorky vyřezané dvěma typy vodního paprsku – mokroabrazivním vodním paprskem a standardním abrazivním vodním paprskem. Srovnání bylo provedeno měřením rozměrů a úkosů na zkušebních vzorcích a získané hodnoty byly přehledně znázorněny.

Při porovnání naměřených výsledků jsem došel k závěru, že mikrořezáním můžeme vyrábět velmi malé, úzké a přesné obrobky vzhledem k menším rozměrům mikropaprsku v porovnání s klasickým abrazivním vodním paprskem. Mikrořezáním se nevytvářely téměř žádné ostřiny a vzniklé úkosy nabývaly nízkých hodnot. Vše pochopitelně záleží na zvolených parametrech řezání a způsobu řezání, což je patrné na vzorku, který byl mikrořezáním vytvořen. Některé otvory, průstřely a drážky nebyly při mnou použitých parametrech řezání vytvořeny či dokončeny.

I když při experimentech provedených v mé bakalářské práci nebylo použito speciální zařízení používané pouze pro mikrořezání včetně přesného polohovacího zařízení, dávkovače abraziva a dalších nezbytných komponent, získané výsledky jasně prokazují, že vzorky vyrobené na standardním řezném stroji ovšem s hlavicí určenou k mikrořezání jsou kvalitnější, přesnější a řezná plocha má jemnější strukturu. Navíc se ukázalo, že není vhodné používat standardní abrazivní řeznou hlavici pro účely mikrořezání a to úpravou parametrů řezání tak, aby odpovídaly parametrům pro mikrořezání. Aby bylo dosaženo požadovaných kvalit obrobku, je nutno použít speciální hlavici pro mikrořezání.

## Seznam použité literatury

- [1] A History of Leadership. *Flow International Corporation*. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>
- [2] ALUNET. [online]. [cit. 2015-04-17]. Normy tvrdosti hliníkových slitin. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/normy-tvrdosti-hlinikovych-slitin/>
- [3] EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*.
- [4] EN 755-2. *Hliník a slitiny hliníku - Lisované tyče, trubky a profily - Část 2: Mechanické vlastnosti*.
- [5] FANTA, M. Osobní sdělení, fa. Galika, 20. 4.2015.
- [6] History of Waterjet Cutting [oline]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.herbertphillips.co.uk/history-of-waterjet-cutting/>
- [7] KRAJNÝ, Z. *Vysokotlakový vodný lúč - WJM*. Bratislava: Uraca, Jún 2011, 172 s. ISBN 978-80-227-3535-3
- [8] KULJAN, G. G., MELHUISE, D. C. *Water-jetting productivity study for the marine industry*. Proceedings of 10<sup>th</sup> American Water jet Conference, August 14-17, 1999: Huston, Texas
- [9] LIU, H. T. *Waterjet technology for machining fine features pertaining to micromachining*. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612510000034>
- [10] MICHNA, Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005, 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [11] MILLER, D. S. *Micromachining with abrasive waterjets*. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360400127X>.
- [12] ORMANIEC, J. *Vliv moderních korekčních systémů nakládění řezné hlavy na kvalitu a rozměry obrobku při 2D řezání vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 54 s.

- [13] PÍŠKA, M. a kol. *Speciální technologie obrábění*. Brno: VUT v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [14] PTV, spol. s r. o. [online]. [cit. 2015-04-17]. Vysokotlaká čerpadla. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv-jets-7-5/60c/>
- [15] RIDDER, H. G. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: [http://www.waterjet-ridder.com/en\\_waricut\\_historie.php](http://www.waterjet-ridder.com/en_waricut_historie.php)
- [16] ŘASA, J., GABRIEL, V., POKORNÝ, P. *Strojírenská technologie 3. Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie, 2. díl*. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-7183-336-3
- [17] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [18] SITEK, L. Osobní sdělení, 15. 4.2015.
- [19] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. London: E & FN Spon, Chapman & Hall, London, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [20] Vodní paprsek [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009/svarovani/2-17.pdf>
- [21] YAHIRO, T., YOSHIDA, H., NISHI, K. *Sheet piles driving and H-steel pulling by high speed water jets*. Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Water Jetting, June 2-4, 1980.
- [22] ZELENÁK, M. *Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace. Disertační práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta Hornicko-geologická, 110s.